

dr hab. inż. Franciszek Tomaszewski
Politechnika Poznańska

Zagadnienia metodyczne projektowania badań diagnostycznych spalinowych pojazdów szynowych

W artykule omówiono podstawowe elementy metodyki badań diagnostycznych spalinowych pojazdów szynowych. Przedstawiono zagadnienia związane z wyborem obiektu badań – zespołu pojazdu szynowego, punktów pomiarowych sygnału, wyborem rodzaju eksperymentu diagnostycznego oraz wielkości pomiarowych (parametrów diagnostycznych). Szczególną uwagę zwrócono na określenie warunków badań diagnostycznych wybranego zespołu pojazdu, częstotliwości obserwacji (pomiarów) diagnostycznych oraz metod wnioskowania o stanie technicznym zespołu. Omawiane zagadnienia podparto przykładami rozwiązań dla lokomotywy spalinowej serii SP45.

1. Wprowadzenie

Transport szynowy, po transporcie samochodowym, stanowi drugą co do liczności grupę transportową zajmującą się przewozem ludzi, surowców oraz towarów. Badania diagnostyczne pojazdów szynowych, w odróżnieniu od innych środków transportu, takich jak samochód, samolot czy nawet statek, znajdują wśród badaczy małe zainteresowanie. Wynika to z historii transportu szynowego, gdzie jedynym do niedawna środkiem pociągowym był parowóz, który nie wymagał skomplikowanych metod obsługi. Obecny poziom technicznego wyposażenia taboru szynowego wymaga nowoczesnych metod obsługi oraz oceny ich stanu technicznego.

Diagnostyka pojazdów szynowych jest stosowana w kilku zarządach kolejowych, przy czym jest ona ukierunkowana głównie na ocenę działania elektrycznych układów sterowa-

nia oraz aparatury i wyposażenia elektrycznego lokomotyw spalinowych i elektrycznych. Mniej natomiast istnieje urządzeń do oceny stanu technicznego układów mechanicznych pojazdów szynowych.

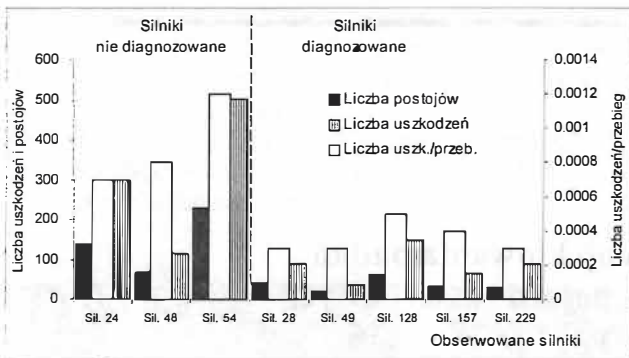
Opracowana przez autora artykułu metoda diagnozowania silników spalinowych lokomotyw SP45 w oparciu o pomiar drgań jest stosowana w Lokomotywowni Poznań [15, 18]. Metoda ta polega na pomiarze przyspieszeń drgań w wybranych punktach na kadłubie silnika podczas przeglądów okresowych. W przypadku przekroczenia przez sygnał wartości dopuszczalnej lub granicznej [5, 19] wykonywana jest analiza widmowa, pozwalająca określić przyczynę przekroczenia przez silnik dopuszczalnego poziomu drgań. Metoda ta daje dobre rezultaty w ogólnej ocenie stanu technicznego silników. Samo przekroczenie wartości granicznej jest już sygnałem do szczegółowej kontroli silnika przez system

obsługi. Głównymi niezdatnościami silników, które stwierdzono w wyniku obsługi są niesprawności układu paliwowego oraz zespołu tłokowo-korbowego, przy czym bardzo ważnym czynnikiem w ocenie stanu silników jest doświadczenie osób obsługujących stanowisko diagnostyczne.

Na rysunku 1 przedstawiono zestawienie wartości wskaźników niezawodności wyznaczonych dla silników spalinowych lokomotyw serii SP45 eksploatowanych w Lokomotywni Poznań. Zestawienie to zawiera następujące wskaźniki:

- liczbę uszkodzeń silnika,
- liczbę postojów lokomotywy spowodowanych niezdatnościami silnika,
- liczbę uszkodzeń odniesioną do przebiegu pojazdu.

Zestawienie to obejmuje silniki nie diagnozowane oraz silniki, które były diagnozowane opracowaną metodą. Przedstawiona analiza wykazała, że zastosowanie diagnostyki do oceny stanu technicznego silników w eksploatacji spowodowało zmniejszenie liczby uszkodzeń awaryjnych, a w związku z tym zmniejszyła się liczba postojów nieplanowych. Wyznaczony wskaźnik w postaci liczby uszkodzeń silnika w stosunku do przebiegu lokomotywy jest wyraźnie mniejszy dla silników, które były diagnozowane.



Rys. 1. Zestawienie liczby uszkodzeń, postojów oraz liczby uszkodzeń w odniesieniu do przebiegu pojazdu szynowego silników spalinowych nie diagnozowanych oraz diagnozowanych

Uzyskane wyniki oceny stanu technicznego grupy eksploatowanych silników spalinowych pojazdów szynowych na podstawie opracowanej metody wykorzystującej tylko jeden symptom w postaci przyspieszeń drgań wykazały, że dla systemu obsługi pojazdów szynowych wystarczająca jest informacja o stanie niezdatności układów, zespołów czy też elementów silnika.

2. Projektowanie eksperymentu diagnostycznego

Zagadnienie projektowania eksperymentów diagnostycznych przedstawiono w pracy [22]. Autor nakreślił podstawowe problemy związane z planowaniem eksperymentów: biernego, czynnego i bierno-czynnego, obejmujące etapy projektowania badań, przetwarzania informacji oraz budowy procedury diagnostycznej. Zaproponowano adaptacyjne procedury projektowania częściowych eksperymentów diagnostycznych obejmujące takie zagadnienia, jak:

- wybór cech stanu obiektu,
- wybór miejsc obserwacji,
- selekcje symptomów wibroakustycznych.

Rozwiązanie tych zagadnień autor przedstawił na przykładzie przekładni zębatej i zrealizowanego eksperymentu diagnostycznego.

W niniejszym artykule przedstawiono projektowanie eksperymentu diagnostycznego złożonego obiektu mechanicznego na przykładzie spalinowego pojazdu szynowego. Zwrócono uwagę na te elementy projektowania eksperymentu, które należy podjąć przed realizacją eksperymentu lub podczas jego trwania, tak aby uzyskać maksymalną ilość informacji o stanie technicznym złożonego obiektu mechanicznego. Zagadnienia te obejmują:

- wybór obiektu badań,
- wybór miejsc pomiarowych,
- wybór rodzaju eksperymentu,
- wybór wielkości pomiarowych,
- określenie warunków badań złożonego obiektu mechanicznego,
- określenie częstotliwości pomiarów,
- wybór odpowiedniej metody wnioskowania.

3. Kryteria wyboru obiektu badań

Wybór obiektu w badaniach diagnostycznych ma istotne znaczenie przy badaniu złożonych obiektów mechanicznych, które należy traktować jako system. Przez system S rozumie się zbiór elementów nazywanych obiektami, powiązanych ze sobą i realizujących zadane funkcje w określony sposób [13]. Każdy z obiektów systemu S można opisać za pomocą zbioru jego cech. W związku z tym system S jest to zbiór obiektów łącznie z relacjami R między nimi, tj.:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_k, R_1, R_2, \dots, R_m\} \quad (1)$$

gdzie: S_i - element systemu S, $i = 1, 2, \dots, k$,
 R_j - relacje między cechami elementów systemu S, $j = 1, 2, \dots, m$.

Objęcie badaniami diagnostycznymi całego systemu jakim jest pojazd szynowy, tzn. wszystkich jego zespołów (obiektów), jest niecelowe z następujących względów:

- ekonomicznych,
 - funkcji spełnianych w obiekcie,
 - małego prawdopodobieństwa uszkodzenia jego elementów w eksploatacji itp.
- W związku z tym należy wybrać taki obiekt systemu, który ma wpływ na niezawodność, koszty eksploatacji oraz realizowane funkcje w systemie.

Do podstawowych kryteriów, jakimi należy się kierować dokonując wyboru obiektu badań diagnostycznych można zaliczyć [17]:

- odpowiedzialność obiektu (zespołu) w realizowanym ciągu procesu technologicznego (realizacji głównych funkcji roboczych),
- funkcjonalność obiektu (zespołu) w pojeździe,
- wpływ obiektu na bezpieczeństwo (osób, towaru, środowiska itp.),
- zawodność działania,
- koszty utrzymania obiektu (zespołu) w stanie zdadności.

Przedstawione kryteria nie wyczerpują wszystkich możliwości, jakimi można się kierować przy wyborze obiektu do badań diagnostycznych.

Trzy pierwsze kryteria wyboru obiektu badań można zaliczyć do subiektywnego problemu decyzyjnego. Określenie dla nich obiektywnych wartości, za pomocą których można dokonać wyboru obiektu badań jest kłopotliwe, i jest najczęściej oparte na analizie zjawisk przyczynowo-skutkowych. Pozostałe dwa kryteria umożliwiają wyznaczenie w badaniach eksploatacyjnych wartości liczbowych i na ich podstawie dokonanie obiektywnego wyboru. Zastosowanie ostatnich kryteriów do wyboru obiektu badań diagnostycznych zaprezentowane będzie na przykładzie spalinowego pojazdu szynowego [16].

Traktując spalinowy pojazd szynowy jako system, można wyróżnić w nim zespoły: podstawowe (główne) – takie, które są związane z realizacją głównego procesu roboczego pojazdu oraz pomocnicze (drugorzędne) – najczęściej usprawniające pracę oraz obsługę pojazdu. Na podstawie takiego podziału kłopotliwe jest podjęcie decyzji, który zespół pojazdu należy poddać diagnozowaniu.

W związku z powyższym należy przeprowadzić identyfikację aktualnego stanu niezawodnościowego oraz kosztów utrzymania w stanie zdatności poszczególnych zespołów i podzespołów pojazdu. Przeprowadzona na podstawie badań eksploatacyjnych analiza niezawodnościowa i ekonomiczna pozwoli wybrać zespół pojazdu o największej zawodności lub kosztach ponoszonych na jego utrzymanie w stanie zdatności, które dalej postanowiono nazwać „słabym ogniwem” pojazdu, jednocześnie przyjmując ten zespół do badań diagnostycznych.

Do określenia „słabego ogniwa” pojazdu zaproponowano następujące wskaźniki niezawodnościowe i ekonomiczne:

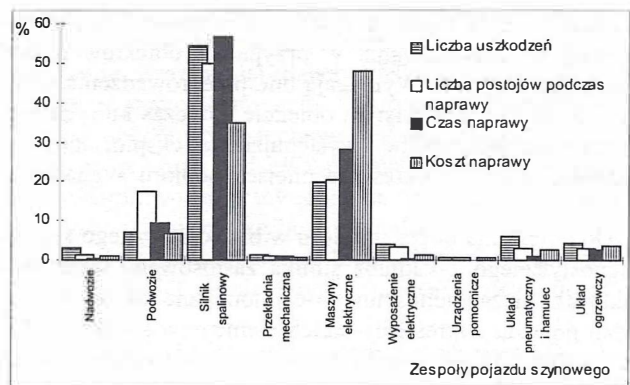
- ilość uszkodzeń – dotyczy wszystkich uszkodzeń, jakie wystąpiły w danym zespole, uniemożliwiając jego poprawne funkcjonowanie,
- ilość dni postoju podczas naprawy – jest to sumaryczny czas, w jakim pojazd nie wykonuje pracy ze względu na naprawę danego zespołu. Czas ten jest sumą czasów oczekiwania na naprawę, czasu naprawy oraz czasu oczekiwania na użytkowanie po naprawie,
- czas naprawy – obejmuje cały czas, jaki zużyto na naprawę danego zespołu,
- koszt naprawy – wskaźnik ten dotyczy wszystkich kosztów, jakie są ponoszone na naprawę danego zespołu.

Koszt naprawy zespołu można wyznaczyć z zależności:

$$K_{zj} = \sum_{i=1}^M (c_{ei} + k_{ei}) \quad (2)$$

gdzie: K_{zj} – koszt naprawy j-tego zespołu,
 c_{ei} – cena i-tego elementu,
 k_{ei} – koszt wymiany i-tego elementu,
 M – liczba elementów w zespole.

Przedstawione wskaźniki obliczono dla statystycznie wyznaczonej próby spalinowych pojazdów szynowych, a okres obserwacji zawierał się pomiędzy dwoma naprawami rewizyjnymi. Na rysunku 2 przedstawiono procentowy udział wskaźników dla wyróżnionych zespołów spalinowego pojazdu szynowego.



Rys. 2. Procentowy udział wskaźników niezawodnościowych dla wyróżnionych zespołów lokomotywy

Zespołem o największej zawodności w eksploatacji spalinowego pojazdu szynowego jest silnik spalinowy. Liczba jego uszkodzeń stanowi 54,2% wszystkich uszkodzeń pojazdu, przy liczbie postojów wynoszącej 50% wszystkich postojów pojazdu, co oznacza, że co drugi postój był związany z niezdatnością silnika spalinowego. Czas naprawy silnika spalinowego stanowi 56,6% całego czasu naprawy pojazdu, a koszty naprawy silnika spalinowego wynoszą 34,8% łącznych kosztów naprawy pojazdu. Na podstawie przeprowadzonej analizy przyjęto, że silnik spalinowy jest „najslabszym ogniwem” (zespołem) spalinowego pojazdu szynowego, zatem obiektem badań.

4. Wybór miejsc pomiarowych

Określenie właściwych miejsc (punktów) pomiaru, w których dokonuje się pomiaru i rejestracji sygnału ma duże znaczenie ze względu na ilość i jakość pozyskiwanych informacji o badanym obiekcie. Autorzy w pracach z diagnostyki stosują różne metody określania (wyboru) miejsc pomiaru wibroakustycznego sygnału diagnostycznego [11, 18, 22]. Do stosowanych i proponowanych przesłanek, jakimi należy się kierować przy wyborze miejsc pomiaru sygnału diagnostycznego można zaliczyć:

- miejsce (obszar) na obiekcie o największym poziomie generowanego sygnału hałasu (charakterystyka A lub Lin.),
- miejsce (obszar) na obiekcie o największym poziomie generowanego sygnału drganiowego (charakterystyka liniowa),
- miejsce (obszar) na obiekcie charakteryzujące się widmem o największej liczbie składowych, odpowiadających częstotliwości pracy poszczególnych zespołów, par kinematycznych i elementów obiektu,
- potencjalne miejsce generowania sygnału uszkodzenia (zespół, para kinematyczna, element o największej zawodności),
- miejsca pomiarowe nieskorelowane ze sobą (analiza korelacyjna pomiędzy arbitralnie wybranymi miejscami pomiaru sygnału),
- badania wstępne – symulacyjne.

Przedstawione sposoby wyboru miejsc pomiaru sygnału na obiekcie pozwalają w sposób obiektywny określić takie miejsca, przy czym najlepszą metodą określania miejsc są badania symulacyjne oraz analiza niezawodnościowa [18].

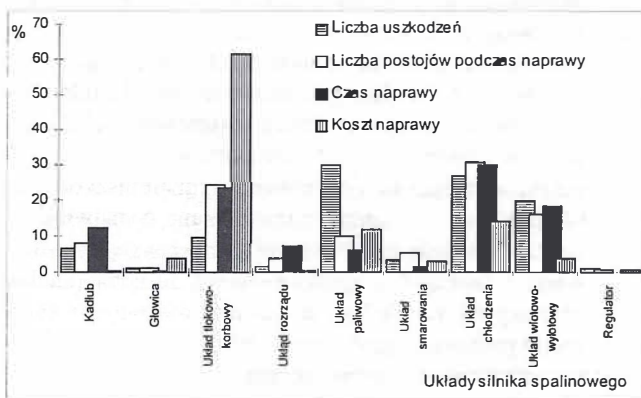
Badania wstępne (symulacyjne) są kosztowne i często niemożliwe do zrealizowania w przypadku obiektów dużych oraz jednostkowych. Wymagają one przeprowadzenia szerokich badań na rzeczywistym obiekcie, podczas których będą symulowane potencjalne (występujące w eksploatacji) niezdatności obiektu i określane miejsca odbioru sygnału diagnostycznego.

Do określenia miejsc odbioru wibroakustycznego sygnału diagnostycznego z kadłuba silnika zastosowano takie same wskaźniki niezawodnościowe i ekonomiczne jak dla obiektu badań pojazdu. Określenie takich elementów silnika pozwoliło wybrać miejsca odbioru wibroakustycznego sygnału diagnostycznego. Przyjęto dalej zasadę, iż elementy takie są potencjalnymi źródłami generowania wibroakustycznego sygnału uszkodzenia, przetworniki pomiarowe drgań umieszczono blisko tych źródeł [6]. Na rysunku 3 przedstawiono procentowy udział wskaźników niezawodnościowych dla wyróżnionych układów silnika spalinowego.

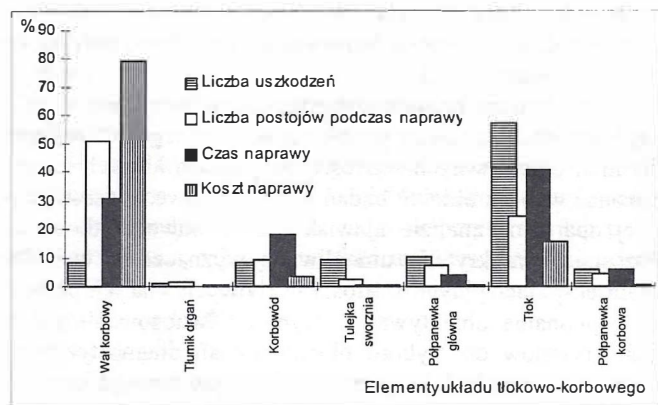
Przeprowadzona analiza niezawodnościowa na poziomie układów silnika spalinowego wykazała, że największa liczba uszkodzeń wystąpiła w układzie paliwowym – 30% oraz w układzie chłodzenia – 27% wszystkich uszkodzeń silnika. Również w układzie chłodzenia wystąpiła największa liczba postojów podczas naprawy – 30,6% łącznej liczby postojów silnika oraz 30% czasu naprawy z powodu niezdatności tego układu. Analiza kosztów naprawy wykazała, że w eksploatacji największe koszty są ponoszone na naprawę układu tłokowo-korbowego i stanowią 61,4% wszystkich kosztów związanych z usunięciem niezdatności silnika.

Biorąc pod uwagę wysokie koszty naprawy (przywrócenie stanu zdadności) układu tłokowo-korbowego, wybrano ten zespół silnika jako jego „najślabsze ogniwo”. W celu szczegółowego wyboru punktów odbioru sygnału diagnostycznego przeprowadzono taką samą analizę niezawodnościową na poziomie układu tłokowo-korbowego. Wyniki tej analizy przedstawiono na rysunku 4.

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że elementami układu tłokowo-korbowego o największej zawodności są: wał korbowy oraz tłok. Zastosowane wskaźniki niezawodnościowe oraz ekonomiczne wykazały największe wartości tylko dla tych dwu elementów, przy czym największe koszty stwierdzono dla wału korbowego silnika; wynoszą one aż 79,1% wszystkich kosztów naprawy układu tłokowo-korbowego.



Rys. 3. Procentowy udział wskaźników niezawodnościowych dla układów silnika spalinowego



Rys. 4. Procentowy udział wskaźników niezawodnościowych dla układu tłokowo-korbowego silnika spalinowego

W związku z tym, iż wał korbowy oraz tłok wykazują zdecydowanie wysoki poziom zawodności, wybrano dwa charakterystyczne miejsca odbioru drganiowego sygnału diagnostycznego z kadłuba silnika spalinowego. Pierwsze miejsce mocowania przetworników drgań na wysokości ZZ (zwrot zewnętrzny) tłoka, drugie miejsce na wysokości osi ułożyskowania wału korbowego silnika. Zaprezentowana w pracy metoda wyboru miejsc pomiarowych dała odpowiedź na pytanie: w którym miejscu mierzyć?, co przy niepełnym rozeznaniu mechanizmów generowania i propagacji drgań w danym obiekcie jest trudne do określenia za pomocą innych metod.

5. Wybór rodzaju eksperymentu

Planowanie każdego eksperymentu jest związane z zastosowaniem znanych technik planowania eksperymentu [8]. Techniki te mają jednak ograniczone zastosowanie przy planowaniu eksperymentów diagnostycznych, gdyż często są one uwarunkowane możliwościami ich realizacji. Dlatego w badaniach diagnostycznych, których celem jest określenie relacji stan → sygnał, przy założeniu przyczynowo-skutkowego modelu działania obiektu diagnostyki, wyróżnia się trzy rodzaje eksperymentów diagnostycznych [3, 22]:

- czynny,
- bierny,
- czynno-bierny.

Eksperyment czynny – polega na celowej zmianie wartości parametrów stanu i obserwacji sygnału. W tym rodzaju eksperymentu można w ograniczonym zakresie stosować najnowsze techniki planowania eksperymentu oraz opracowywania jego wyników [8]. Zastosowanie wyników tego eksperymentu w praktyce jest ograniczone ze względu na konieczność kilkukrotnego demontażu i montażu obiektu. Z praktyki natomiast wiadomo, że każdy demontaż elementów zmienia charakter współpracy elementów obiektu, tak że kolejny pomiar dotyczy już zmienionego obiektu. Trudno tu więc o poprawne wnioskowanie, gdyż każdy kolejny pomiar dotyczy "nowego" obiektu. W pracach dotyczących eksploatacji obiektów technicznych twierdzi się, że każdy nieuzasadniony demontaż pogarsza stan techniczny maszyny i to jest przyczyną poszukiwania bezdemontażowych metod diagnostyki. Eksperyment ten jest stosowany głównie do badania wpływu zakłóceń oraz sterowania na wartości wektora sygnału.

Eksperyment bierny – polega na obserwacji parametrów sygnału bez znajomości parametrów stanu z możliwością kontroli sterowania i zakłóceń. W tym rodzaju eksperymencie wyróżnia się dwa jego warianty. Pierwszy dotyczy obserwacji sygnałów diagnostycznych obiektu od początku jego eksploatacji aż do jej zakończenia lub uszkodzenia obiektu. Zaletą tej formy zbierania danych jest nie zakłócenie normalnej pracy (eksploatacji) obiektu, wadami zaś są:

- długi czas obserwacji parametrów diagnostycznych w postaci wektora obserwacji o składowych $S = \{s_j\}$,
- fragmentaryczność zebranych informacji ze względu na niewielki zazwyczaj zakres zmian wartości parametrów w czasie normalnej pracy,
- możliwość skonstruowania błędnego modelu w przypadku pominięcia istnienia wspólnych zależności czynników wpływających na własności wyjść modelu $S = \{s_j\}$, oraz własności wejść sterujących obiektem $E = \{e_j\}$ przez nieznaną dla eksperymentatora zakłócenia $Z = \{z_j\}$,
- trudności obliczeniowe związane z wyznaczeniem analitycznej postaci modelu matematycznego.

Drugi wariant polega na równoczesnej obserwacji sygnałów określonej grupy obiektów będących w różnych stanach eksploatacyjnych. Najlepszym doбором grupy obiektów do badań jest taki rozkład ich czasów eksploatacji, aby dołącznie odwzorować krzywą stanu technicznego (krzywą życia) badanych obiektów.

Eksperyment czynno-bierny – polega na obserwacji parametrów sygnału z równoczesnym pomiarem parametrów stanu dla jednej lub dwu wartości stanu obiektu lub czasu eksploatacji bez ingerencji w wartości parametrów stanu. Jako jedną wartość stanu przyjmuje się najczęściej obiekty wyeksploatowane (przed naprawą), dla dwu wartości stanu przyjmuje się: pierwszą wartość – stan obiektów nowych (przed rozpoczęciem eksploatacji), a drugą wartość – dla obiektów wyeksploatowanych (przed naprawą).

Przy wyborze rodzaju eksperymencie należy kierować się przyszłym zastosowaniem wyników oraz możliwościami realizacji eksperymencie, a więc można kierować się następującymi przesłankami:

- miejscem zastosowania diagnostyki w procesie eksploatacji obiektu (obsługiwanie, użytkowanie),
- ograniczeniami w realizowaniu eksperymencie diagnostycznego (czasowe, ilościowe oraz koszty eksperymencie).

Największe zastosowanie w diagnostyce wibroakustycznej mają eksperymencie: czynno-bierny i bierny. Eksperyment czynno-bierny jest stosowany do oszacowania wartości granicznych symptomów, umożliwiających klasyfikację dwustanową obiektu: zdalny, niezdalny. Bierny eksperymencie pozwala odwzorować krzywą stanu technicznego w celu obserwacji intensywności procesu uszkodzenia się obiektu lub zmniejszającej się jego zdolności.

6. Wybór wielkości pomiarowych

Wybór właściwej wielkości pomiarowej, szczególnie w diagnostyce wibroakustycznej ma istotne znaczenie ze względu na różne ich wrażliwości na zmiany stanu technicznego obiektu oraz określenie minimalnej liczby mierzonych

parametrów, takich by zawierały one maksymalną ilość informacji o stanie badanego obiektu. Jednak trudno jest dokonać oceny wrażliwości danej wielkości na zmiany stanu obiektu na etapie planowania eksperymencie diagnostycznego. Dlatego dokonując wstępnego wyboru wielkości pomiarowych, należy brać pod uwagę: charakter pracy obiektu, zakres częstotliwości pracy obiektu oraz sposób generacji i propagacji wibroakustycznego sygnału uszkodzenia [1].

Metody, jakimi można się kierować przy wstępnym określeniu wielkości pomiarowych dla oceny stanu obiektu są następujące:

- analiza kinematyczna obiektu – wyznaczenie charakterystycznych częstotliwości pracy poszczególnych zespołów, elementów obiektu,
- analiza procesów roboczych, towarzyszących, tribologicznych itp. zachodzących w obiekcie, zespołach lub parach kinematycznych,
- badania wstępne.

Metody redukcji wektora sygnału przedstawiono w pracach [3, 4, 22]. W pracach [3, 4] autor zaproponował wybór parametrów diagnostycznych w biernym eksperymencie diagnostycznym na podstawie algorytmu programu BEDIND (*Bierny Eksperyment Detekcji Informacji Diagnostycznej*) pracującego w dwu wersjach: nienormowanej i normowanej. W wersji nienormowanej podstawą wyboru jest macierz kowariancji i w związku z tym program dokonuje wyboru parametrów niosących maksimum informacji (charakteryzujących się dużą dynamiką zmian). Natomiast w wersji normowanej podstawą wyboru jest macierz korelacji, pozwalająca dokonać parametrów maksymalnie niezależnych od siebie, takich, które mogą nieść informacje o dwu różnych uszkodzeniach. W pracy [22] autor zaproponował wybór parametrów w oparciu o macierz korelacji (podobnie jak program BEDIND), dokonując wyboru parametrów niezależnych.

Wymienione metody redukcji parametrów diagnostycznych mają jedną wspólną cechę – dokonują wyboru parametrów bez powiązania ich zmian eksploatacyjnych ze stanem obiektu. Najlepszą jest metoda polegająca na wyborze tych parametrów, których zmiany są powiązane ze stanem niezawodnościowym (uszkodzeniami) obiektu.

Jednak dla uzyskania możliwie pełnej informacji o wrażliwości poszczególnych wielkości na zmiany stanu niezawodnościowego trzeba przeprowadzić badania diagnostyczne i niezawodnościowe, a na ich podstawie wybrać te parametry sygnału, które są skorelowane z procesem uszkodzenia obiektu. Istota tej metody została przedstawiona przez autora w pracy [20].

7. Określenie warunków badań

We wszystkich badaniach, a szczególnie w badaniach diagnostycznych, istotnym zagadnieniem jest określenie warunków badań. Mają one decydujący wpływ na obiektywność uzyskanych wyników, zakres pozyskiwanych informacji o stanie obiektu oraz powtarzalność wyników w kolejnych eksperymencie. Do podstawowych warunków badań zalicza się: określenie miary eksploatacyjnej starzenia, wybór prędkości obrotowej i obciążenia oraz temperaturę czynnika chłodzącego silnik. Wyboru prędkości obrotowej można dokonać na podstawie:

- badania składu widmowego sygnału dla poszczególnych prędkości obrotowych,

- analizy maksymalnych wartości sygnału dla poszczególnych prędkości obrotowych,
- badania stacjonarności sygnału poprzez analizę statystyczną widma amplitudowego.

Określenie obciążenia, przy jakim powinien być badany obiekt dokonuje się najczęściej na podstawie:

- badań składu widmowego sygnału dla poszczególnych wartości obciążenia dla danej prędkości obrotowej,
- analizy maksymalnych wartości sygnału dla poszczególnych wartości obciążenia dla danej prędkości obrotowej.

Dla niektórych urządzeń pojazdu szynowego (z wyjątkiem silnika), np. sprężarki powietrza, wentylatorów itp., problem doboru prędkości obrotowej do badań nie występuje ze względu na stałą prędkość obrotową pracy.

Budując model diagnostyczny silnika spalinowego oraz program badań, można wyróżnić następujące czynniki charakteryzujące warunki badania [10, 21]:

- Θ – miara eksploatacyjna starzenia silnika,
- P – obciążenie silnika,
- N – prędkość obrotowa silnika,
- T – temperatura silnika.

Miara eksploatacyjna starzenia silnika

Jako wektor charakteryzujący miarę eksploatacyjną starzenia badanego obiektu Θ mogą być przyjęte różne wielkości. Dla pojazdów mechanicznych może to być przebieg wyrażony w jednostce przebiegu, np. km, czas pracy pojazdu wyrażony w jednostce czasu, np. godzina, dzień lub motogodziny pracy. Dla obiektów wykonujących cykliczne prace, np. prasa, robot itp. może być liczba wykonanych sztuk, liczba wykonanych cykli itp. Dla badanego silnika spalinowego pojazdu szynowego przyjęto przebieg pojazdu. Bardziej obiektywną wielkością byłby czas pracy silnika spalinowego, jednakże tego typu mierniki nie są stosowane w eksploatacji pojazdów szynowych. W związku z tym przyjęto jako eksploatacyjną miarę starzenia silnika przebieg lokomotywy wyrażony w km.

Obciążenie silnika

Wektor charakteryzujący obciążenie silnika spalinowego pojazdu szynowego $P = \{p_j\}$ (gdzie $j = 1, 2, \dots, m$) składa się z m współrzędnych odpowiadających kolejnym pozycjom nastawnika jazdy. Na każdej pozycji nastawnika jazdy silnik spalinowy pojazdu szynowego rozwija określoną moc. Badanie wpływu obciążania silnika spalinowego na poziom amplitudy sygnału wibroakustycznego przedstawiono w pracach [11, 12, 14], w których autorzy stwierdzili, że obciążanie silnika spalinowego w małym stopniu zwiększa poziomy uśrednionych amplitud przyspieszeń drgań w stosunku do pracy silnika bez obciążenia. Wyniki przedstawione w pracy [11] wykazały, że najbardziej wrażliwym pasmem na zmiany obciążania silnika jest pasmo 200 Hz do 1,6 kHz. Natomiast w pracy [9] autor stwierdził, że obciążanie silnika w nieznanym stopniu wpływa na poziom hałasu generowanego przez pracujący silnik. Również własne badania autora niniejszej pracy [14] wykazały, że obciążanie silnika nie zmienia kształtu widma sygnału, powoduje natomiast wzrost jego poziomu dla kolejnych obciążeń.

Ponieważ wpływ obciążania silnika na poziom amplitudy sygnału jest nieznaczny, można przyjąć badanie silnika bez zadawanego obciążenia, podobnie jak w pracach [7, 11]. Podczas badań występuje niewielkie stałe obciążenie silnika związane z napędem urządzeń pomocniczych (sprężarka, wentylatory itp.).

Prędkość obrotowa wału korbowego silnika

Wektor prędkości obrotowej $N = \{n_k\}$ (gdzie $k=1, 2, \dots, m$), podobnie jak wektor obciążenia, składa się z m współrzędnych odpowiadających prędkościom obrotowym wału korbowego silnika na poszczególnych pozycjach nastawnika jazdy.

Jak wykazały badania [7, 9, 11, 12], prędkość obrotowa silnika wpływa na wartości amplitud przyspieszeń drgań, natomiast charakter przebiegu widma nie ulega zmianie. Ponieważ wpływ prędkości obrotowej silnika jest istotny, przeprowadzono badania mające na celu dokonanie jej wyboru. Do wyboru prędkości obrotowej wału korbowego silnika zastosowano metodę przedstawioną w pracy [7], polegającą na badaniu stacjonarności sygnału amplitudowo-częstotliwościowego uzyskanego dla poszczególnych prędkości obrotowych wału korbowego silnika. W tym celu dokonano pomiaru przyspieszeń drgań w kilku punktach na kadłubie silnika dla każdej prędkości obrotowej, a następnie wykonano widma tercjowe przyspieszeń drgań. Dla każdej prędkości obrotowej wyliczono z widma następujące miary statystyczne:

- wartość średnią – \bar{x} ,
- wariancję – s ,
- odchylenie standardowe – σ ,
- moment zwyczajny drugiego rzędu – m_2 ,
- wrażliwość – w ,
- rozstęp poziomów pasm widma – R .

W tablicy 1 przedstawiono przykładowe wyliczone wartości podanych miar statystycznych dla poszczególnych prędkości obrotowych wału korbowego silnika, a w tablicy 2 – wyliczone przyrosty miar statystycznych podanych w tablicy 1 w zależności od przyrostu prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

Tablica 1

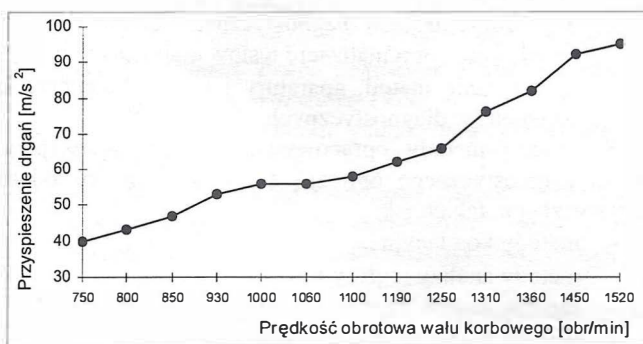
Wartości miar statystycznych dla poszczególnych prędkości obrotowych

Miary Obroty	\bar{x}	s	σ	m_2	w	R
750	4,91	32,60	5,71	53,44	5,02	24,67
800	5,36	38,69	6,22	59,08	4,96	26,59
850	5,75	46,38	6,81	66,64	4,97	28,60
930	5,73	47,06	6,86	77,86	5,02	28,75
1000	6,97	68,78	8,29	114,8	4,96	34,54
1060	6,15	53,56	7,32	111,33	4,99	30,70
1100	6,38	57,74	7,50	110,6	4,95	31,59
1190	7,88	100,40	10,02	157,6	5,13	42,79
1200	7,90	91,06	9,54	151,95	5,02	40,16
1310	8,87	122,8	11,08	198,52	5,19	46,04
1360	10,10	163,59	12,79	264,44	4,36	44,05
1450	11,30	181,47	13,47	308,96	4,99	56,41
1520	10,74	159,92	12,65	292,66	4,89	52,47

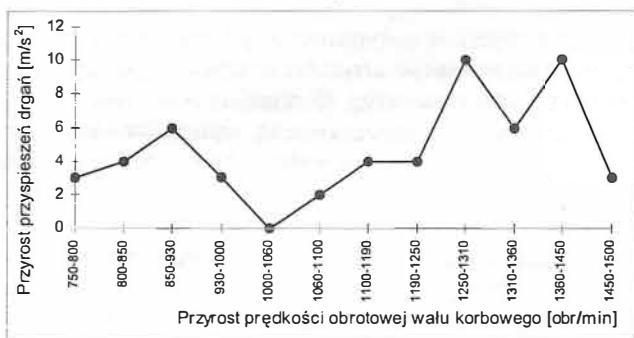
Tablica 2

Wartości przyrostów wskaźników w zależności od przyrostu liczby obrotów

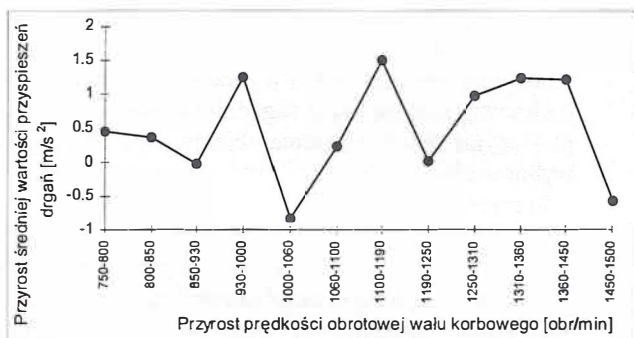
Przyrosty miar	$\Delta \bar{x}$	Δs	$\Delta \sigma$	Δm_2
Przyrost obrotów				
750–800	0,45	6,09	0,51	5,64
800–850	0,37	7,69	0,59	7,56
850–930	-0,02	0,68	0,05	11,22
930–1000	1,24	21,72	1,43	36,94
1000–1060	-0,82	-15,22	-0,97	-3,47
1060–1100	0,23	4,18	0,28	-0,73
1100–1190	1,50	42,66	2,42	47,0
1190–1250	0,02	-9,34	-0,48	-5,65
1250–1310	0,97	31,74	1,54	46,57
1310–1360	1,23	40,79	1,71	65,92
1360–1450	1,20	17,88	0,68	44,52
1450–1520	-0,56	-21,55	-0,82	-16,3



Rys. 5. Przyrosty poziomów przyspieszeń drgań w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika



Rys. 6. Przyrosty poziomów wartości przyspieszeń drgań w stosunku do przyrostu prędkości obrotowej wału korbowego



Rys. 7. Przyrosty średnich wartości przyspieszeń drgań w stosunku do przyrostu prędkości obrotowej wału korbowego

Analizując przyrost wartości przyspieszeń drgań (poziom L) dla poszczególnych obrotów wału korbowego (rys. 5), zauważono, iż ze wzrostem prędkości obrotowej następuje wzrost poziomu przyspieszeń drgań, natomiast w obrębie 1000 do 1060 obr/min nie występuje wpływ prędkości obrotowej na poziom drgań. Wartości wskaźników (tabl. 1) również w obrębie tych prędkości obrotowych wykazują obniżenie wpływu prędkości obrotowej na poziom drgań, a przyrosty wskaźników (tabl. 2) wykazują wartości ujemne. Wzrost prędkości obrotowej wału korbowego powoduje wzrost poziomu widma (wzrost dynamiki), nie zmieniając jego charakteru. W związku z tym brak jest istotnego wpływu prędkości obrotowej wału korbowego na poziom w pasmach widma.

Ze względu na to, że w obrębie 1000 do 1060 obr/min występuje zmniejszenie wpływu prędkości obrotowej na poziom drgań (rys. 6 i 7), do badań diagnostycznych wybrano prędkość obrotową 1000 obr/min. Zapewnia ona stacjonarność sygnału podczas pomiarów, przy niewielkich zmianach prędkości obrotowej wału korbowego podczas pracy silnika.

Temperatura czynnika chłodzącego

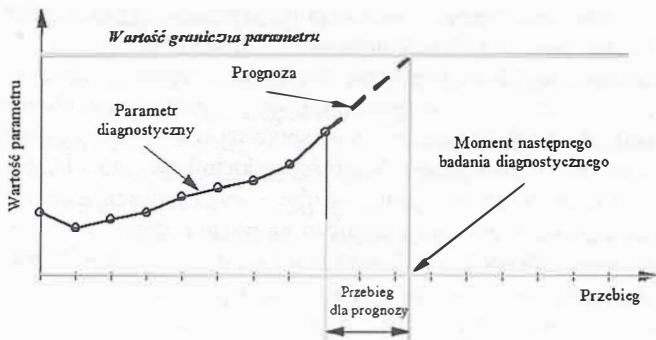
Wektor charakteryzujący temperaturę silnika $T = \{t_i\}$ jest ograniczony warunkami pracy silnika. W związku z tym w badaniach przyjęto temperaturę czynnika chłodzącego silnik na poziomie 70–80°C. Jest to temperatura, w której pracuje silnik, a układ zabezpieczenia reaguje na te granice temperatur. Wykonywanie pomiarów, w normalnych warunkach eksploatacji, przy innych temperaturach czynnika chłodzącego powoduje przeregulowanie systemu regulacji temperatury silnika.

8. Określenie częstotliwości pomiarów

Częstotliwość pomiarów (diagnoz) jest związana z przyjętym rodzajem eksperymentu diagnostycznego i dotyczy głównie biernego eksperymentu diagnostycznego. Częstotliwość pomiarów można określić (wyznaczyć) na podstawie:

- obowiązującego systemu przeglądów i napraw obiektu,
- zastosowanych metod prognozowania,
- wyznaczonych średnich wartości przebiegów lub czasów pomiędzy uszkodzeniami zespołów, elementów, pojazdu,
- analizy intensywności zjawisk zachodzących w obiekcie, zespołach lub parach kinematycznych.

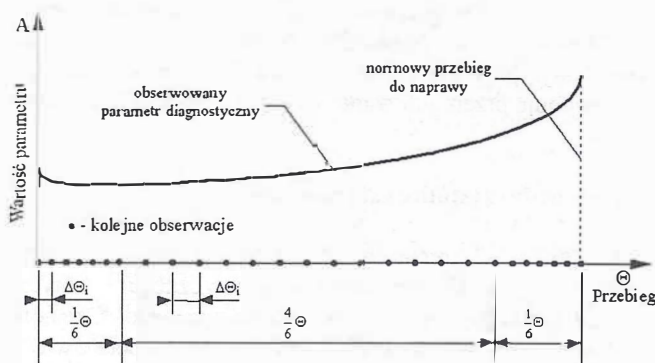
Zastosowanie metod prognozowania w systemie kontroli stanu zdadności silników opiera się na założeniu przyczynowości a nawet determinizmu w relacji stan → sygnał lub zaawansowanie zużycia → symptom. Przy takim założeniu prognoza stanu może być realizowana przy znanym modelu stan-symptom i przy nieznanym modelu trendu. Na rysunku 8 przedstawiono ogólny schemat wyznaczania następnego badania diagnostycznego w oparciu o zastosowanie jednej z metod prognozowania zmian symptomu diagnostycznego. Zastosowanie metod prognozowania wymaga znajomości wartości granicznych parametru (poziomu alarmowego), tzn. takich wartości symptomu, powyżej których następuje przejście obiektu w stan niezdatności.



Rys. 8. Schemat wyznaczania następnego badania diagnostycznego na podstawie prognozy symptomu

Określenie częstotliwości pomiarów w oparciu o istniejący cykl przeglądów i napraw pozwala na uzyskanie przebiegu sygnału przed wykonaniem przeglądu (regulacji, wymian itp.) oraz po wykonaniu przeglądu. Dzięki takiemu postępowaniu można uzyskać sygnały oraz widma wzorcowe dla najczęściej występujących niezdatności obiektu podczas jego eksploatacji.

Wektor miary starzenia eksploatacyjnego $\Theta = \{\theta_i\}$ (gdzie $i = 1, 2, \dots, r$) dzieli się na r współrzędnych θ_i , w którym przeprowadza się kolejne pomiary diagnostyczne. Na rysunku 9 przedstawiono schemat częstotliwości obserwacji diagnostycznej na tle krzywej zmian parametru diagnostycznego.



Rys. 9. Schemat częstotliwości pomiarów diagnostycznych w eksploatacji

Odcinki $\Delta\theta_i$ utworzone z kolejnych współrzędnych wektora Θ cechują się różną długością. W początkowym i końcowym okresie eksploatacji obiektu pomiary winny być wykonane z większą częstotliwością, natomiast w środkowym okresie eksploatacji częstotliwości pomiarów powinna odpowiadać częstotliwości wykonywania przeglądów okresowych.

Zagęszczenie częstotliwości pomiarów w początkowym i końcowym okresie eksploatacji pozwoli w początkowym okresie eksploatacji zarejestrować uszkodzenia związane z „błędami młodości”, dotyczącymi okresu docierania obiektu, natomiast w końcowym okresie eksploatacji zarejestrować uszkodzenia związane z ostatnim okresem eksploatacji, tzw. „katastroficznym zużyciem”.

9. Wnioskowanie o stanie technicznym

Problemem w każdym eksperymencie jest przyjęcie poprawnej filozofii wnioskowania dla uzyskania maksymalnych informacji o badanym obiekcie. W związku z tym, wybór

metody (sposobu) wnioskowania oraz opracowania wyników eksperymentu diagnostycznego jest zdeterminowany celem badań. W eksperymencie diagnostycznym opracowanie wyników i wnioskowanie związane są głównie z:

- określeniem warunków badań,
- szacowaniem wartości granicznych symptomu,
- badaniem zmian sygnału (symptomu) w funkcji miary starzenia obiektu,
- lokalizacją uszkodzeń (niezdatności) obiektu, zespołu, elementu,
- prognozowaniem stanu obiektu.

Opracowanie efektywnej procedury diagnostycznej obejmuje:

- badanie i określenie przydatności procesów roboczych i resztkowych jako źródeł informacji diagnostycznej,
- opracowanie modeli generacji sygnałów diagnostycznych,
- ustalenie stanów granicznych diagnozowanych obiektów,
- opracowanie modeli diagnostycznych obiektów technicznych,
- organizację procesu diagnostycznego, obejmującą minimalizację i optymalizację testów diagnostycznych,
- opracowanie metod, aparatury i metodyki mierzenia parametrów diagnostycznych.

Stosowane metody opracowywania wyników eksperymentu diagnostycznego opierają się głównie na metodach statystycznych, takich jak:

- metody korelacyjne,
- metody analizy regresyjnej,
- metody analizy czynnikowej,
- metody aproksymacji stochastycznej.

10. Podsumowanie

Projektowanie eksperymentu diagnostycznego złożonego obiektu mechanicznego przedstawiono na przykładzie spalinyowego pojazdu szynowego. W niniejszym artykule:

- omówiono możliwe kryteria wyboru obiektu badań oraz przeprowadzono wybór obiektu badań na przykładzie pojazdu szynowego z zastosowaniem kryterium niezawodnościowego i ekonomicznego,
- przedstawiono sposoby wyboru miejsc pomiarowych oraz sposób wyboru miejsc pomiarowych z zastosowaniem kryterium niezawodnościowego i ekonomicznego,
- omówiono rodzaje eksperymentów diagnostycznych oraz zwrócono uwagę na zakres ich stosowania,
- przedstawiono sposoby wyboru (redukcji) wielkości pomiarowych,
- omówiono warunki badań wybranego obiektu, w których uwzględniono takie zagadnienia, jak: wybór eksploatacyjnej miary starzenia obiektu, jego obciążenia, wybór prędkości obrotowej oraz temperatury czynnika chłodzącego,
- przedstawiono możliwe sposoby rozwiązania problemu częstotliwości pomiarów diagnostycznych w przypadku diagnostyki eksploatacyjnej,
- omówiono problem przyjęcia właściwej filozofii wnioskowania dla uzyskania maksymalnej informacji o badanym obiekcie w zależności od celu badań.

Literatura

- [1] Cempel C., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1985.
- [2] Cempel C., Jabłoński A., Marciniak Z., Tomaszewski F., *Diagnostyka silników spalinowych pojazdów szynowych w warunkach lokomotywowni. III krajowa konferencja „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów”*, Szczyrk 1995, tom 3, s. 71–78.
- [3] Cempel C., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT, Warszawa 1982.
- [4] Cempel C., *Redukcja zbioru danych w diagnostyce maszyn. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, 1980, vol. 44, nr 4, s. 571–5.
- [5] Cempel C., Tomaszewski F., *Stan graniczny i dopuszczalny w diagnozowaniu silników kolejowych. VIII Szkoła Diagnostyki Technicznej*, Rydzyna 1987, s. 177–183.
- [6] Cempel C., *Wibroakustyka stosowana*. PWN, Warszawa 1978.
- [7] Leśniowski J., *Badania możliwości określania stopnia docierania i zużywania się silnika spalinowego bez jego demontażu. Praca doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna*, Warszawa 1971.
- [8] Mańczak K., *Technika planowania eksperymentu*. WNT, Warszawa 1976.
- [9] Miazga J., *Próba wprowadzenia akustycznych metod pomiarowych do oceny stanu technicznego silnika samochodowego. Archiwum Akustyki*, 1971, tom 6, zeszyt 4, s. 353–368.
- [10] Moczarski M., *Kierunki rozwoju systemów remontów taboru kolejowego. Problemy Kolejnictwa*, Warszawa 1976, nr 66, s. 99–130.
- [11] Niziński S., *Badania akustyczne stanu technicznego tłokowych silników spalinowych. Praca doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna*, Warszawa 1975.
- [12] Pelc H., Raszkow J., *Opracowanie metody badań diagnostycznych silników spalinowych. Praca doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna*, Warszawa 1973.s
- [13] Stanicki T., *redakcja, Teoria systemów*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1975.
- [14] Tomaszewski F., *Badanie wpływu obciążania silnika na poziom sygnału wibroakustycznego. Maszynopis niepublikowany, Politechnika Poznańska, Poznań 1995.*
- [15] Tomaszewski F., Cempel C., *An Attempt to Diagnose a Locomotive Combustion Engine by Utilizing Vibroacoustic Processes. Archives of Transport, volume 3, nr 1, 1991, s. 373–287.*
- [16] Tomaszewski F., *Wybór zespołu lokomotywy spalinowej do badań diagnostycznych. IV konferencja „Pojazdy szynowe”*, Kraków 1983, s. 437–445.
- [17] Tomaszewski F., *Wybrane problemy badań diagnostycznych pojazdów szynowych. X konferencja naukowa „Pojazdy szynowe”*, Wrocław 1994, s. 244–249.
- [18] Tomaszewski F., *Zastosowanie procesów wibroakustycznych do oceny stanu technicznego silnika spalinowego lokomotywy. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1987.*
- [19] Tomaszewski F., *Zastosowanie wybranych estymat sygnału drganiowego do oceny stanu technicznego silników trakcyjnych. Seminarium naukowe „Eksploatacja silników samochodowych”*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1991, s. 88–92.
- [20] Tomaszewski F., *Zagadnienia wyznaczania stanu technicznego złożonego obiektu mechanicznego za pomocą sygnału wibroakustycznego. Na przykładzie silnika spalinowego pojazdu szynowego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy Nr 337, 1998.*
- [21] Walicki J., Węclewski S., *Badania diagnostyczne i rejestracja uszkodzeń spalinowych pojazdów trakcyjnych. Biuletyn Techniczny ZPM H. Cegielski*, 1974, nr 8–10, s. 171–173.
- [22] Żółtowski B., *Projektowanie eksperymentów w diagnostyce maszyn (na przykładzie diagnostyki wibroakustycznej). Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Rakietowych i Artylerii im. gen. J. Bema, Seria wydawnicza – Rozprawy Naukowe nr 1, Toruń 1984.*