

Dr hab. inż. Franciszek Tomaszewski
Instytut Silników Spalinowych
i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Politechnika Poznańska

Możliwości zastosowania diagnostyki w procesie obsługi pojazdów szynowych

W artykule omówiono podstawowe metody obsługi pojazdów ze szczególnym uwzględnieniem kosztów ponoszonych w eksploatacji dla zapewnienia ich stanu zdatności. Najbardziej efektywną metodą obsługi jest metoda z zastosowaniem diagnostyki. Przedstawione wyniki badań korelacyjnych pomiędzy parametrami sygnału wibroakustycznego a stanem elementów (luzami) oraz intensywnościami uszkodzeń silników spalinowych pojazdów szynowych wykazały, że najlepsze odwzorowanie istnieje pomiędzy procesem uszkodzania silnika, opisanym za pomocą intensywności uszkodzeń a parametrami sygnału wibroakustycznego. To stwierdzenie było podstawą dalszych badań zmierzających do opracowania metody diagnozowania stanów niezawodnościowych silników spalinowych pojazdów szynowych.

Wprowadzenie

System eksploatacji taboru kolejowego w większości krajów jest oparty na metodzie planowo–zapobiegawczych napraw [2]. Jak stwierdzono w pracach [3, 24], metoda ta przy obecnym poziomie technicznym taboru szynowego nie zdaje już egzaminu, ze względu na małą jej efektywność. Przeprowadzone badania trwałości podstawowych serii lokomotyw spalinowych eksploatowanych w PKP [8, 9] wykazały, że trwałość większości elementów głównych zespołów lokomo-

tyw jest wystarczająca, tzn. w momencie przekazania do naprawy rewizyjnej nie przekroczyły one wartości granicznych zużyć. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że np. w lokomotywie serii ST44 71,5% elementów nie osiągnęło wymiaru granicznego, natomiast 28,5% elementów osiągnęło względnie przekroczyło wymiar graniczny. W lokomotywach serii ST43 odpowiednio: 53% i 47%, a w lokomotywach serii SM42: 79% i 21%. Pomimo takiego stanu elementów, lokomotywy te poddano naprawie rewizyjnej zgodnie z założeniami metody planowo–zapobiegawczej.

Zarządy kolejowe wielu krajów, w tym i PKP, realizują od wielu lat prace, których celem jest unowocześnienie obecnego systemu eksploatacji, opartego na założeniach metody planowo-zapobiegawczej [18, 19]. W Polsce prace w tym zakresie podjęto już w latach siedemdziesiątych [8, 9, 16], część z nich została zakończona a niektóre przerwano w trakcie realizacji.

Prace w kierunku zmiany metody planowo-zapobiegawczej są prowadzone, oprócz taboru kolejowego, również w innych działach transportu. Najbardziej zaawansowane są: w transporcie samochodowym [13, 22, 26], transporcie morskim [1, 7] oraz transporcie lotniczym [15, 25]. Prace takie są prowadzone również w odniesieniu do innych urządzeń technicznych, np. obrabiarek [10, 33], turbozespołów i generatorów [5, 21], maszyn górniczych [14].

Metoda planowo-zapobiegawcza obsługi pojazdów

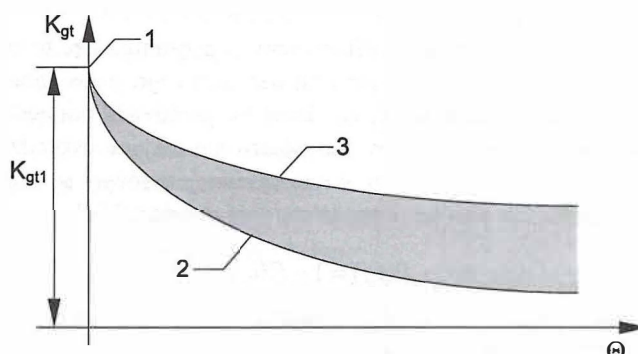
Metoda planowo-zapobiegawcza napraw ukształtowała się w miarę wzrostu ilościowego i zmian jakościowych konstrukcji pojazdów mechanicznych, a także w wyniku konieczności ich utrzymania w stanie zdadności. W pracy [17] autor uważa, że jest ona niesłusznie nazywana metodą planowo-zapobiegawczą. Powinna być nazwana – metodą statyczną. W metodzie tej terminy obsługi są stałe, ustalone na podstawie wieloletnich doświadczeń eksploatacyjnych lub przeprowadzonych badań niezawodnościowych. Na przykład w PKP metoda ta została wprowadzona w 1954 roku [2], jako obowiązująca dla wszystkich środków trwałych, w tym również dla pojazdów szynowych. Polega ona na wykonywaniu okresowych zabiegów regulacyjnych i naprawczych po przepracowaniu przez pojazd określonego czasu lub przebiegu.

Metoda planowo-zapobiegawcza charakteryzuje się tym, że [18]:

- jest jedyną stosowaną w PKP metodą obsługi pojazdów,
- jest metodą autonomiczną, ponieważ procesy integracyjne z innymi systemami technicznymi są bardzo wolne w stosunku do zmian w nich zachodzących,
- pojazd traktowany jest jako całość, co powoduje każdorazowo wyłączenie z użytkowania na czas przeglądu i naprawy całego pojazdu, niezależnie od rodzaju obsługi i stanu technicznego poszczególnych zespołów pojazdu,
- struktura cyklu planowo-zapobiegawczego jest stała i niezależna od stanu i wieku taboru,
- struktura cyklu planowo-zapobiegawczego jest ściśle określona, uniemożliwiająca ewentualną zmianę zakresu obsługi lub przebiegu międzyobsługowego w przypadku zadowalającego stanu technicznego pojazdu,
- wykonywanie przeglądu lub naprawy jest uzależnione od przejechanej przez pojazd liczby kilometrów lub czasu pracy, a nie od stanu technicznego pojazdu.

Metoda planowo-zapobiegawcza jest zaliczana do metod obsługi profilaktycznych. Przez obsługę profilaktyczną rozumie się zespół planowych przedsięwzięć przeprowadzanych na zdadnym obiekcie przez podsystem obsługi, w celu zwię-

kszenia jego współczynnika gotowości oraz zmniejszenia kosztów eksploatacji [17, 34]. Istota profilaktyki polega na wykryciu starzejących się elementów, ich odnowieniu lub wymianie, a także na przywróceniu prawidłowego zakresu pracy obiektu w określonej przestrzeni parametrów [34]. Na rysunku 1 przedstawiono wpływ racjonalnego obsługiwanego na wartość współczynnika gotowości technicznej obiektów [17].



Rys. 1. Wpływ racjonalnego obsługiwanego na wartość współczynnika gotowości technicznej obiektów technicznych w funkcji czasu eksploatacji [17]: 1 – początkowa wartość współczynnika gotowości technicznej, 2 – zmiana współczynnika gotowości technicznej bez stosowania profilaktyki (racjonalnego obsługiwanego), 3 – wpływ stosowania profilaktyki na zmianę wartości współczynnika gotowości technicznej

Stosowanie profilaktyki w systemie eksploatacji oraz jej wpływ na rozkład czasu bezawaryjnej pracy pojazdu można przedstawić, wykorzystując do tego funkcję intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$.

Jeżeli założymy, że w chwili Θ pojazd został poddany profilaktyce, to dla pełnej i idealnej profilaktyki prawdziwa jest zależność [34]:

$$\lambda_p(\Theta + t) = \lambda(t) \quad (1)$$

gdzie: $\lambda(t)$ – funkcja intensywności uszkodzeń pojazdu bez profilaktyki,

$\lambda_p(\Theta + t)$ – funkcja intensywności uszkodzeń pojazdu z profilaktyką.

Profilaktykę (obsługę planową) stosuje się w celu zwiększenia niezawodności pojazdu w określonym przedziale czasu $(0, \tau)$. Na tej podstawie można sformułować kryterium celowości stosowania profilaktyki [34]:

$$P_p(\tau) > P(\tau) \quad (2)$$

gdzie: $P(\tau)$ – funkcja niezawodności pojazdu dla czasu bez profilaktyki,

$P_p(\tau)$ – funkcja niezawodności pojazdu dla czasu z profilaktyką.

Strategia metody planowo-zapobiegawczej (obsługę profilaktycznych) uwzględnia dwa rodzaje obsługi: planową i nieplanową.

Obsługę planową przeprowadza się okresowo, co określony przedział przebiegu pojazdu t_p , jeżeli pojazd nie uległ uszkodzeniu. Zakres tej obsługi jest ściśle określony odpowiednimi przepisami. Jeżeli nastąpiło uszkodzenie pojazdu przed określonym przedziałem przebiegu t_p , to przeprowadza się obsługę nieplanową (regulację, naprawę itp.) i po jej zakończeniu pojazd wraca do użytkowania.

W tej strategii obsługi przyjmuje się następujące założenia [34]:

- charakterystyki niezawodności pojazdu są funkcjami czasu pracy (przebiegu), tzn. pojazd może się uszkodzić tylko podczas pracy,
- po wykonaniu profilaktyki pojazd zostanie całkowicie odnowiony.

W strategii obsługi profilaktycznych przyjmuje się, że obsługę przeprowadza się po upływie losowego czasu pracy (przebiegu) minimum (T , t_p). Jeżeli w przedziale pomiędzy dwiema obsługami planowymi pojazd nie ulegnie uszkodzeniu, to czas pracy pojazdu w tym okresie jest równy t_p . Wartość tę można przyjąć z prawdopodobieństwem [34]:

$$P(t_p) = 1 - F(t_p) \quad (3)$$

gdzie: $F(t_p)$ – rozkład (dystrybuanta) czasu bezawaryjnej pracy pojazdu,
 $P(t_p)$ – prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy pojazdu w chwili t_p .

Jeżeli nastąpi uszkodzenie pojazdu w przedziale pomiędzy dwiema obsługami planowymi, to czas pracy pojazdu przyjmuje wartość z przedziału $(t, t + \Delta t)$ z prawdopodobieństwem [34]:

$$dF(t) = f(t)dt \quad (4)$$

gdzie: $f(t)$ – gęstość prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy pojazdu, stąd oczekiwana wartość czasu pracy pojazdu między kolejnymi profilaktykami wynosi [34]:

$$E_{\min}(T, t_p) = t_p [1 - F(t_p)] + \int_0^{t_p} t \cdot f(t) dt = S(t_p) \quad (5)$$

gdzie: $S(t_p)$ – oczekiwany czas poprawnej pracy pojazdu między kolejnymi profilaktykami.

Iloraz $F(t_p)/S(t_p)$ jest prawdopodobieństwem uszkodzenia w jednostce czasu (przebiegu), a $[1 - F(t_p)]/S(t_p)$ – prawdopodobieństwem poprawnej pracy pojazdu w jednostce czasu (przebiegu).

Istotę systemu planowo-zapobiegawczego można prześledzić, analizując koszty ponoszone na utrzymanie pojazdu w stanie zdatności. Jeżeli oznaczmy:

C_1 – koszty ponoszone na naprawę pojazdu w wyniku uszkodzenia pomiędzy obsługami planowymi, łącznie z kosztami postoju,

C_2 – koszty napraw planowych (profilaktycznych), łącznie z kosztem przestoju pojazdu, to oczekiwany koszt eksploatacji pojazdu w jednostce czasu, przy stosowaniu przyjętej strategii, wyniesie [34]:

$$C(t_p) = \frac{C_1 \cdot F(t_p) + C_2 [1 - F(t_p)]}{\int_0^{t_p} [1 - F(t_p)] dt} \quad (6)$$

Aby zminimalizować funkcję kosztów eksploatacji $C(t_p)$ należy zoptymalizować okresy wymian profilaktycznych t_p . Zakładając ciągłość i różniczkowalność dystrybuanty $F(t)$, optymalny okres wymian profilaktycznych t_p można wyznaczyć, przyrównując do zera pochodną funkcji $C(t_p)$ i rozwiązując otrzymane w ten sposób równanie względem t_p . Wtedy otrzymamy:

$$\lambda(t_p) \int_0^{t_p} [1 - F(t)] dt - F(t_p) = \frac{C_2}{C_1 - C_2} \quad (7)$$

gdzie: $\lambda(t)$ – funkcja intensywności uszkodzeń obiektu.

Przy założeniu, że $\lambda(t)$ jest funkcją rosnącą, istnieje jednoznaczne rozwiązanie powyższego równania. W wyniku przekształceń, minimum oczekiwanych kosztów w jednostce czasu w punkcie $t_p(n)$ wynosi:

$$C(t_p(n)) = (C_1 - C_2) \cdot \lambda(t_p(n)) \quad (8)$$

Wymiany profilaktyczne mają sens tylko wtedy, gdy $C_1 > C_2$. Koszty C_1 i C_2 odpowiadają (są równoważne):

- średniej wartości czasu postoju pojazdu podczas obsługi nieplanowej T_{pn} ,
- średniej wartości czasu postoju pojazdu podczas obsługi planowej T_{pp} .

Wtedy $C(t_p)$ jest współczynnikiem postoju pojazdu $K_p(t_p)$ zależnym od okresu wymian profilaktycznych t_p , a równanie (6) będzie miało postać:

$$K_p(t_p) = \frac{T_{pp} \cdot P(t_p) + T_{pn} F(t_p)}{\int_0^{t_p} P(t) dt} \quad (9)$$

Optymalnej wartości $t_p(n)$ odpowiada minimum wartości współczynnika postoju pojazdu K_p .

Metoda obsługi pojazdów z zastosowaniem diagnostyki

Zmniejszenie kosztów związanych z utrzymaniem pojazdu w stanie zdatności jest możliwe dzięki zastosowaniu diagnostyki. Utrzymanie pojazdów w stanie zdatności z zastosowaniem diagnostyki polega na bieżącej ocenie stanu pojazdu (diagnozie) i na tej podstawie podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych.

W pracy [17] autor wyróżnia dwie metody obsługi pojazdów z zastosowaniem diagnostyki:

- metoda planowo-zapobiegawcza z diagnozowaniem,
 - metoda obsługa według stanu technicznego,
- natomiast w pracy [17] nazywa je odpowiednio metodą quasi-dynamiczną i metodą dynamiczną.

W metodzie pierwszej nadal obowiązują wymiany profilaktyczne według ściśle określonej strategii (stałe terminy obsługa i diagnozowania), co nadal jest związane z kosztami obsługa planowych (profilaktycznych) i kosztami obsługa nieplanowych (uszkodzeń wykrytych w wyniku diagnozy).

Metoda obsługi według stanu technicznego zakłada odnowę pojazdu w odniesieniu do zespołów czy elementów, wskazanych w wyniku przeprowadzonej diagnozy. Podstawowym założeniem w tej metodzie jest pełna diagnoza pojazdu, na podstawie której dokonuje się odnowy całkowitej, a po jej zakończeniu pojazd powinien mieć takie same parametry niezawodności, jak na początku eksploatacji.

W pracy [34] za kryterium jakości kontroli przyjęto średnie koszty cyklu rozumiane jako odstęp czasu (przebiegu) między jedną odnową pojazdu a drugą.

Jeżeli oznaczmy:

C_3 – koszt pojedynczej diagnozy,

C_4 – koszt pracy uszkodzonego pojazdu w czasie t (przebiegu),

C_5 – koszt pojedynczej odnowy,

to według przyjętej strategii diagnoz $\mathfrak{S} = \{t_1, t_2, \dots\}$ średnie koszty na cykl wynoszą:

$$C(\mathfrak{S}) = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} [C_3(k+1) + C_4(t_{k+1} - t)] dF(t) + C_5 \quad (10)$$

a średnia długość cyklu odnow:

$$T(\mathfrak{S}) = T_{EF} + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} (t_{k+1} - t) dF(t) + T_R \quad (11)$$

gdzie: T_{EF} – średni czas pracy bezawaryjnej,

T_R – średni czas odnowy pojazdu.

Przy $t \rightarrow \infty$ średnie straty na jednostkę czasu wynoszą:

$$K(\mathfrak{S}) = \frac{C(\mathfrak{S})}{T(\mathfrak{S})} \quad (12)$$

W tego typu strategii obsługi, koszty na jednostkę czasu (przebiegu) wynikające z diagnozy i odnowy pojazdu nie powinny przekroczyć kosztów na jednostkę czasu, wynikających z pracy uszkodzonego pojazdu, a więc:

$$\frac{C_3 + C_5}{T_{EF} + T_R} \leq C_4 \quad (13)$$

Dla takiego założenia strategia obsługi według stanu technicznego ma sens.

Przedstawione podstawy teoretyczne dwu głównych metod obsługi pojazdów mechanicznych nie wyczerpują wszystkich możliwych metod utrzymania pojazdów, jakie powstały dla poprawienia efektywności ich eksploatacji. Proponowane przez autorów prac [12, 23, 31, 32] inne metody obsługi pojazdów opierają się na założeniach metody planowo–zapobiegawczej napraw.

Inne metody obsługi pojazdów

Do innych metod obsługi pojazdów, jakie powstały na bazie metody planowo–zapobiegawczej, można zaliczyć metodę wymian zapobiegawczych z uwzględnieniem „wieku” urządzenia [32]. W tej metodzie przyjmuje się, że wymiana zapobiegawcza zależy od osiągnięcia określonego wieku urządzenia, czyli od ostatniej wymiany musi upłynąć okre-

ślony czas poprawnej pracy obiektu, niezależnie od tego, czy była wymiana zapobiegawcza czy awaryjna. Podstawowym założeniem w tej metodzie jest to, że koszt wymiany uszkodzonego urządzenia jest większy niż koszt wymiany zapobiegawczej, dzięki czemu określa się optymalny odstęp wymian zapobiegawczych, dla których łączne koszty wymian są minimalne.

Udoskonaleniem metody planowo–zapobiegawczej obsługi jest zastosowanie systemów informatycznych [12, 23]. Wtedy jej istota polega na rejestrowaniu zdarzeń eksploatacyjnych (uszkodzeń) obiektu i wyznaczaniu odpowiednich wskaźników niezawodnościowych, na podstawie których podejmuje się decyzje o obsłudze pojazdu. Jednocześnie dla każdej (bieżącej) sytuacji eksploatacyjnej są wyznaczane koszty i optymalne terminy obsługi.

W pracy [31] przedstawiono metodę obsługi polegającą na inspekcji urządzenia technicznego, która jest pierwszym etapem wprowadzenia metody dynamicznej. Idea tej metody polega na:

- maszyny i urządzenia są sklasyfikowane według grup uwzględniających stopnie ważności,
- w odniesieniu do poszczególnych grup, planuje się inspekcje zapobiegawcze z różną częstotliwością i w różnym zakresie,
- na podstawie inspekcji uzyskuje się informacje o stanie technicznym urządzenia i na ich podstawie planuje się termin i zakres odnow.

Przez inspekcje rozumie się ustalony z góry zestaw pomiarów i badań w czasie eksploatacji. Od szczegółowości inspekcji zależy prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzenia, a tym samym wzrasta koszt wykonywanej inspekcji.

Na podstawie analizy istniejących metod obsługi pojazdów mechanicznych można stwierdzić, że:

- metoda planowo–zapobiegawcza obsługi:
 - w niewielkim stopniu uwzględnia stan pojazdu,
 - ułatwia organizację przeglądów i napraw,
 - może być udoskonalona przez diagnozowanie,
- koszty utrzymania pojazdu w stanie zdadności są większe w metodzie obsługi planowo–zapobiegawczej ze względu na koszty uszkodzeń, jakie występują w okresie między obsługami planowanymi oraz ewentualnymi ich skutkami,
- w metodzie planowo–zapobiegawczej rzeczywisty czas użytkowania jest skrócony w stosunku do planowanego o czas wyłączenia z powodu uszkodzeń w okresie między obsługami,
- metoda obsługi z zastosowaniem diagnostyki (według stanu technicznego, dynamiczna) przy pełnej diagnozie zapobiega wystąpieniu uszkodzeń oraz ewentualnym ich skutkom,
- czas użytkowania pojazdu w metodzie obsługi z diagnozowaniem (według stanu technicznego) jest dłuższy niż w metodzie planowo–zapobiegawczej bez diagnozowania, gdyż istnieje możliwość wydłużenia przebiegu międzydynamnaprawczego ze względu na stan pojazdu,

Odwzorowanie uszkodzeń silnika spalinowego w sygnale diagnostycznym

W pracach dotyczących diagnostyki, głównym kierunkiem badań jest znalezienie relacji pomiędzy stanem zespołów, elementów silnika opisanym za pomocą zbioru parametrów stanu $X(\Theta) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, a wartościami parametrów sygnału diagnostycznego $S(\Theta) = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$. Znalezienie takich relacji pozwoliłoby przejść ze statycznej metody obsługi silników spalinowych pojazdów szynowych na obsługiwanie według stanu technicznego. Jednak jak wykazały własne badania [28, 29] oraz badania innych autorów [20], znalezienie bezpośredniego odwzorowania pomiędzy stanami elementów silnika a parametrami sygnału wibroakustycznego nie zawsze jest możliwe dla wszystkich wyróżnionych elementów silnika spalinowego.

Przeprowadzone własne badania silników spalinowych a8C22 [27, 28, 29] pracujących w lokomotywach serii SM42 miały na celu określenie związków oraz relacji pomiędzy stanem elementów silników wyeksploatowanych (przekazanych do naprawy) a wartościami parametrów sygnału wibroakustycznego.

W tablicach 1 i 2 przedstawiono wyniki badań korelacyjnych pomiędzy luzami par kinematycznych silnika a parametrami sygnału wibroakustycznego [27, 28]. W tablicach tych zamieszczono tylko wartości współczynników korelacji $r > 0,30$, ponieważ wartość współczynnika korelacji $r \leq 0,30$ świadczy o słabym związku pomiędzy badanymi cechami.

Wartości współczynników korelacji pomiędzy luzami a parametrami sygnału wibroakustycznego silnika spalinowego a8C22 [28]

Tablica 1

Pary kinematyczne	Parametry sygnału						
	Ask	Asz	Vsk	Vsz	Ca	Cv	fv
Głowica							
PrZss1	—	—	—	—	—	0,45	0,51
PrZss2	0,50	0,43	—	0,65	—	-0,36	—
PrZw1	—	—	—	—	—	—	—
PrZw2	-0,51	-0,51	-0,45	—	-0,38	—	—
DzZss	—	—	—	—	—	—	—
DzZw	-0,55	-0,61	-0,63	—	-0,60	—	0,47
ŁZwPr	—	—	—	—	—	—	—
ŁDzZw	—	—	—	0,48	—	-0,41	—
Zwrot zewnętrzny							
TiCyl	—	—	—	0,43	—	—	-0,48
1PUsz	—	—	—	—	—	—	—
2PUsz	—	—	—	-0,50	—	—	—
3PUsz	—	—	—	-0,50	—	—	-0,33
4PUsz	—	—	—	—	—	—	—
5PZg	-0,51	-0,52	-0,49	-0,50	—	—	—
SwTi	—	—	—	—	0,54	—	—
ŁoKor	0,40	—	0,52	0,46	-0,88	—	-0,51
PoZss	—	—	—	—	—	—	—
PoZw	—	—	—	-0,36	—	-0,69	—
PoPw	—	—	—	—	0,53	—	—
ŁPier	—	—	—	-0,41	—	—	—
ŁPop	—	0,38	—	-0,34	—	-0,71	—
Wał korbowy/rozrządu							
ŁoGł	0,76	0,71	—	—	—	-0,59	-0,39
ŁoRoz1	0,40	0,47	0,48	0,78	0,99	—	—
ŁoRoz2	0,92	0,89	—	0,34	—	—	-0,42

- DzZss – luz między tulejką dźwigni zaworów ssących a sworzniem
- DzZw – luz między tulejką dźwigni zaworów wydechowych a sworzniem
- ŁDzZw – luz łączny dźwigni zaworów
- ŁoGł – luz między czopem głównym wału korbowego a panewką główną
- ŁoKor – luz między czopem korbowym wału a panewką korbowodową
- ŁoRoz1 – luz między czopem łożyskowym a panewką 1 wałka rozrządu
- ŁoRoz2 – luz między czopem łożyskowym a panewką 2 wałka rozrządu
- ŁPier – luz łączny pierścieni
- ŁPop – luz łączny popychaczy
- ŁZwPr – luz łączny zaworów w prowadnicach
- PoPw – luz między popychaczem pompy wtryskowej a prowadnicą
- PoZss – luz między popychaczem zaworów ssących a prowadnicą
- PoZw – luz między popychaczem zaworów wydechowych a prowadnicą
- PrZss1 – luz między prowadnicą a trzonem 1 zaworu dolotowego
- PrZss2 – luz między prowadnicą a trzonem 2 zaworu dolotowego
- PrZw1 – luz między prowadnicą a trzonem 1 zaworu wylotowego
- PrZw2 – luz między prowadnicą a trzonem 2 zaworu wylotowego
- SBIUw – skumulowana bieżąca względna intensywność uszkodzeń
- SIUw – skumulowana względna intensywność uszkodzeń
- SwTi – luz między sworzniem tłoka a tulejką korbowodu
- TiCyl – luz między tłokiem a tuleją cylindra
- 1PUsz – luz między 1 pierścieniem uszczelniającym a rowkiem tłoka
- 2PUsz – luz między 2 pierścieniem uszczelniającym a rowkiem tłoka
- 3PUsz – luz między 3 pierścieniem uszczelniającym a rowkiem tłoka
- 4PUsz – luz między 4 pierścieniem uszczelniającym a rowkiem tłoka
- 5PZg – luz między 5 pierścieniem zgarniającym a rowkiem tłoka
- Ask – skuteczna wartość przyspieszeń drgań
- Asz – szczytowa wartość przyspieszeń drgań
- Ca – współczynnik szczytu przyspieszeń drgań
- Cv – współczynnik szczytu prędkości drgań
- fv – częstotliwość Ricea prędkości drgań
- Vsk – skuteczna wartość prędkości drgań
- Vsz – szczytowa wartość prędkości drgań

Wartości współczynników korelacji pomiędzy luzami a poziomami przyspieszeń
drgań w pasmach widma tercjowego silnika spalinowego a8C22 [27]

Tablica 2

Pary kinematyczne	Pasma widma tercjowego [Hz]										
	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100
Głowica											
PrZss1	—	-0,33	-0,31	—	-0,39	-0,31	-0,50	-0,51	-0,45	—	-0,42
PrZss2	0,43	—	—	—	—	—	—	—	—	0,61	0,34
PrZw1	0,38	—	0,57	—	—	0,37	—	0,43	0,57	0,49	0,56
PrZw2	-0,44	-0,43	—	-0,47	-0,37	-0,33	—	—	—	-0,34	—
DzZss	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
DzZw	-0,42	-0,62	-0,31	-0,64	-0,53	-0,48	-0,31	—	—	—	—
ŁZwPr	—	-0,39	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ŁDzZw	—	—	—	—	-0,39	—	-0,44	-0,44	-0,36	—	—
Zwrot zewnętrzny											
TiCyl	0,52	0,56	0,64	0,75	0,79	0,79	—	0,53	—	0,44	0,34
1PUsz	0,59	0,62	0,65	0,76	0,87	0,87	—	0,47	0,38	0,32	0,32
2PUsz	—	-0,31	—	—	—	—	—	—	-0,34	-0,40	—
3PUsz	—	—	—	—	—	—	-0,33	—	-0,54	-0,32	—
4PUsz	—	—	—	—	—	—	—	—	-0,50	—	—
5PZg	-0,42	-0,47	-0,37	—	—	—	-0,36	—	-0,47	-0,36	—
SwTł	0,37	0,40	0,39	0,31	—	—	—	—	—	—	—
ŁoKor	—	—	—	—	—	—	0,58	—	0,53	—	0,37
PoZss	—	-0,40	-0,48	-0,51	-0,62	-0,62	—	—	-0,58	—	-0,31
PoZw	0,41	0,32	—	—	—	—	—	—	—	—	—
PoPw	0,50	0,53	0,57	0,64	0,64	0,64	—	—	—	0,33	—
ŁPier	—	—	—	—	0,31	0,31	—	—	-0,40	—	—
ŁPop	0,45	0,31	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Wał korbowy/rozrządu											
ŁoGł	—	0,32	0,76	0,73	0,86	0,87	—	0,97	0,98	0,69	0,64
ŁoRoz1	0,52	-0,63	—	0,40	—	—	-0,80	-0,35	-0,32	-0,60	—
ŁoRoz2	0,54	0,40	0,94	0,91	0,98	0,98	—	-0,89	0,88	0,66	0,65

Przedstawione wyniki badań korelacyjnych pomiędzy stanem silników (wyeksploatowanych) opisanym za pomocą wartości luzów jego par kinematycznych a parametrami sygnału wibroakustycznego oraz poziomami w pasmach widma tercjowego przyspieszeń drgań wykazały:

- brak jednoznacznego odwzorowania między wartościami luzów par kinematycznych a parametrami sygnału wibroakustycznego,
- brak jednoznacznego odwzorowania między luzami łącznymi takich samych par kinematycznych silnika a parametrami sygnału wibroakustycznego,
- za pomocą podstawowych parametrów sygnału wibroakustycznego nie można dokonać jednoznacznej oceny stanu technicznego par kinematycznych silnika.

Przyczyną braku jednoznacznego odwzorowania były niewielkie zużycia elementów silników w stosunku do wartości luzów dopuszczalnych. Parametry sygnału (amplitudowe) wyznaczane były dla całego sygnału, a więc szerokiego przedziału częstotliwości. Parametry takie, jak zaznaczono w [6] wykazują dobre własności diagnostyczne dla urządzeń o prostej strukturze kinematycznej (np. wentylatory). Dla urządzeń o skomplikowanej kinematyce, a takim jest silnik spalinowy, mogą być wskaźnikami jedynie ogólnego stanu urządzenia.

Brak jednoznacznego odwzorowania pomiędzy wartościami luzów par kinematycznych silnika a parametrami oraz poziomami w pasmach widm sygnału wibroakustycznego był przyczyną podjęcia nowych badań diagnostycznych i niezawodnościowych. Badania te miały na celu stwierdzenie istnienia związków pomiędzy procesem uszkodzania się silnika spalinowego lokomotywy a parametrami sygnału wibroakustycznego [11, 30].

Przeprowadzone badania eksploatacyjne polegały na pomiarach parametrów sygnału wibroakustycznego z jednoczesną rejestracją uszkodzeń, jakie wystąpiły w badanych silnikach. Na podstawie uzyskanych danych z badań wyznaczano współczynnik korelacji pomiędzy parametrami sygnału wibroakustycznego oraz ich kumulantami a wskaźnikami niezawodności. Kumulanta [4] jest to średnia geometryczna jednego parametru zarejestrowanego w kilku punktach na kadłubie silnika liczona według zależności:

$$K_i(\Theta) = \sqrt[n]{s_{i1}(\Theta) \cdot s_{i2}(\Theta) \cdot \dots \cdot s_{in}(\Theta)} \quad (14)$$

gdzie: $K_i(\Theta)$ – kumulanta i-tego parametru sygnału,

$s_{in}(\Theta)$ – wartość i-tego parametru w n-tym punkcie pomiarowym.

**Wartości współczynnika korelacji pomiędzy parametrami sygnału
a wskaźnikami niezawodności silnika 2112 SSF**

Tablica 3

Wskaźniki niezawodności Estymaty sygnału	IUw	SIUw	BIUw	SBIUw
V _{śr}	-0,730	0,899	-0,815	0,893
H _v	-0,272	0,622	-0,484	0,832
X _{sk}	-0,637	0,871	-0,786	0,932
V _{sz}	-0,729	0,916	-0,796	0,922
K _{V_{śr}}	-0,555	0,988	-0,790	0,995
K _{H_v}	-0,169	0,841	-0,434	0,830
K _{X_{sk}}	-0,473	0,976	-0,737	0,970
K _{V_{sz}}	-0,472	0,994	-0,680	0,976

W diagnostyce wibroakustycznej kumulanta jest stosowana do wyróżnienia dominującego sposobu uszkodzania się obiektu.

W tablicy 3 przedstawiono wyniki uzyskane z badań korelacyjnych pomiędzy parametrami sygnału, kumulantami oraz wskaźnikami niezawodności.

- V_{śr} – średnia wartość prędkości drgań
- H_v – współczynnik harmonicznosci prędkości drgań
- X_{sk} – skuteczna wartość przemieszczeń drgań
- V_{sz} – szczytowa wartość prędkości drgań
- K_{V_{śr}} – kumulanta średniej wartości prędkości drgań
- K_{H_v} – kumulanta współczynnika harmonicznosci prędkości drgań
- K_{X_{sk}} – kumulanta skutecznej wartości przemieszczeń drgań
- K_{V_{sz}} – kumulanta szczytowej wartości prędkości drgań
- BIUw – bieżąca względna intensywność uszkodzeń
- IUw – względna intensywność uszkodzeń
- SBIUw – skumulowana bieżąca względna intensywność uszkodzeń
- SIUw – skumulowana względna intensywność uszkodzeń

Przedstawione wyniki badań korelacyjnych pomiędzy parametrami sygnału, kumulantami a wskaźnikami niezawodności (tabl. 3), w odróżnieniu od badań korelacyjnych pomiędzy luzami elementów silnika a parametrami sygnału wibroakustycznego (tabl. 1 i 2), wykazały duże wartości współczynników korelacji. W szczególności dotyczy to skumulowanych intensywności uszkodzeń (SIUw i SBIUw) i podstawowych parametrów drgań. Uzyskane duże wartości współczynników korelacji (powyżej 0,9) świadczą o odwzorowaniu procesu uszkodzeń zachodzącego w silniku spalinowym w wybranych parametrach sygnału wibroakustycznego.

Na podstawie przedstawionych wyników badań korelacyjnych pomiędzy procesem uszkodzania zachodzącym w silniku spalinowym, opisanym za pomocą wskaźników niezawodności, a parametrami sygnału wibroakustycznego, stwierdzono istnienie związku między procesem uszkodzania silnika spalinowego a parametrami sygnału wibroakustycznego. Stwierdzenie takiego związku jest podstawą dalszych ba-

dań, mających na celu opracowanie metody wyznaczania stanów niezawodnościowych silników spalinowych pojazdów szynowych w oparciu o zarejestrowane w eksploatacji parametry sygnału wibroakustycznego. Zakres tych badań obejmować będzie następujące zagadnienia:

- analizę istniejących metod diagnozowania silników spalinowych oraz stosowanych systemów diagnostycznych spalinowych pojazdów szynowych,
- opracowanie metodyki diagnozowania pojazdów szynowych, obejmujących: wybór obiektu badań, punktów pomiarowych, parametrów diagnostycznych, rodzaju eksperymentu diagnostycznego oraz warunków badań i częstotliwości obserwacji diagnostycznej,
- opracowanie i analizę wyników badań diagnostycznych silników spalinowych pojazdów szynowych metodą eksperymentu czynno-biernego,
- opracowanie i analizę wyników badań diagnostycznych silników spalinowych pojazdów szynowych metodą eksperymentu biernego,
- opracowanie modelu diagnostyczno-niezawodnościowego silnika spalinowego dla wyznaczania stanów niezawodnościowych silnika na dowolnym poziomie jego struktury funkcjonalnej,
- identyfikację i weryfikację opracowanego modelu diagnostyczno-niezawodnościowego silnika spalinowego, w oparciu o zbiór obserwacji diagnostycznych zarejestrowanych podczas eksploatacji,
- ocenę stanu niezawodnościowego silnika spalinowego w oparciu o zarejestrowany w eksploatacji wektor parametrów sygnału wibroakustycznych, za pomocą opracowanego modelu diagnostyczno-niezawodnościowego.

Podsumowanie

W artykule omówiono podstawowe metody obsługiowania pojazdów. Na podstawie analizy kosztów ponoszonych na poszczególne rodzaje obsługi pojazdów stwierdzono, że metoda obsługi z zastosowaniem diagnostyki jest najbardziej efektywna, gdyż koszty diagnozy i odnowy nie przekraczają kosztów pracy uszkodzonego pojazdu. Metoda obsługi według stanu zapobiega wystąpieniu uszkodzeń i ich skutkom. Jednocześnie czas użytkowania pojazdu jest dłuższy niż w

metodzie planowo-zapobiegawczej bez diagnozowania, gdyż istnieje możliwość wydłużenia przebiegu międzynaprawczego ze względu na stan pojazdu.

Możliwości zastosowania diagnostyki w systemie utrzymania spalinowych pojazdów szynowych na przykładzie silnika spalinowego przedstawiono na podstawie wstępnych wyników badań diagnostycznych. Badania korelacyjne pomiędzy parametrami sygnału wibroakustycznego a stanem silnika opisanym za pomocą zbioru parametrów struktury (luzów) wykazały bardzo mały związek. W związku z tym odwzorowanie luzów par kinematycznych silnika w parametrach sygnału, przy tak złożonym obiekcie jak silnik spalinowy jest nie zawsze możliwe. W kolejnych badaniach korelacyjnych pomiędzy parametrami sygnału a stanem niezawodnościowym silnika, stwierdzono silny związek między parametrami sygnału wibroakustycznego a procesem uszkodzeń silnika opisanym za pomocą funkcji intensywności uszkodzeń.

W praktyce eksploatacyjnej nie zawsze istotna jest dokładna wartość stanu poszczególnych elementów obiektu (np. wartość luzu), lecz tylko jakościowe klasyfikowanie stanu obiektu, jego układów czy zespołów. Dzięki nowemu podejściu do zagadnień diagnostyki możliwa będzie ocena stanu obiektu w sensie niezawodnościowym, wskazująca na uszkodzenie układu lub zespołu badanego obiektu. W związku z tym, dalsze prace ukierunkowane będą na opracowanie metody diagnozowania stanów niezawodnościowych silnika spalinowego pojazdu szynowego.

W kolejnych artykułach prezentowane będą wyniki prac zmierzających do opracowania metody diagnozowania stanów niezawodnościowych silników spalinowych pojazdów szynowych.

Literatura

[1] Bielawski P., *Obsługowy system diagnostyczny, struktura i miejsce w systemie obsługiwanym. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska*, 1991, nr 7, s.22–24.
[2] Bogdański W., *Systemy przeglądów i napraw pojazdów trakcyjnych. Problemy Kolejnictwa*, Warszawa 1975, nr 66, s. 49–98.
[3] Brzózka G., *Uzasadnienie celowości zastosowań diagnostyki w pojazdach szynowych. Pojazdy Szyno-we*, 1977, nr 1, s. 3–6.
[4] Cempel C., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1985.
[5] Cempel C., *Określenie stanu granicznego w drganiowej diagnostyce maszyn pomocniczych bloku energetycznego. Energetyka*, 1985, nr 2, s. 55–56.
[6] Cempel C., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn. WNT*, Warszawa 1982.
[7] Girtler J., *Sterowanie procesem eksploatacji okrętowych silników spalinowych na podstawie diagnostycznego modelu decyzyjnego. Akademia Marynarki Wojennej, Zeszyt Naukowy*, Gdynia 1989, nr 100A.
[8] Gronowicz J., Fórmaniak A., Kadziński A., Tomaszewski F. i inni, *Badania trwałości i niezawodności lokomotyw spa-*

linowych serii SM42, ST43, ST44 dla opracowania cyklu utrzymania tych lokomotyw. Politechnika Poznańska, Poznań 1978–79, załączniki A, B i C, maszynopis.
[9] Gronowicz J., Fórmaniak A., Kadziński A., Tomaszewski F. i inni, *Badania trwałości i niezawodności silnika spalinowego lokomotywy SP45. Politechnika Poznańska, Poznań 1984, maszynopis.*
[10] Jędrzejewski J., Kwaśny W., *Diagnostyka maszyn obróbkowych – potrzeby i możliwości. IX Szkoła Diagnostyki*, Poznań–Rydzyń 1989, s. 45–48.
[11] Kadziński A., Tomaszewski F., *Próba wykorzystania procesów wibroakustycznych oraz wybranych wskaźników niezawodności do oceny stanu eksploatacyjnego silnika spalinowego. IV Konferencja Naukowa Instytutu Transportu Politechniki Warszawskiej, Jachranka k/Warszawy, 1985, s. 106–113.*
[12] Krawczyński F., Targoński M., *System informatyczny bieżącej oceny stanu technicznego taboru szynowego PKP. Przegląd Kolejowy Mechaniczny*, 1975, nr 11, s. 316–321.
[13] Kruk Z., *Badania efektywności procesu odnowy zdolności z obsługą diagnostyczną w systemie eksploatacji samochodów. Praca doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1978.*
[14] Lipowczan A., *Wibroakustyczna diagnostyka maszyn i urządzeń górniczych. GIG, Katowice 1986.*
[15] Łukomski B., *Wrażliwość parametryczna układu regulacji lotniczego silnika turbinowego w aspekcie diagnostyki niezawodnościowej. Szkoła Zimowa Niezawodności, Jaszowiec 1978, s. 126–131.*
[16] Marciniaś J., *Plan koordynacyjny problemu resortowego MK–126 pt.: System cykli przeglądów i napraw pojazdów szynowych w oparciu o techniczne środki diagnostyki. Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa, Warszawa 1977.*
[17] Michalski R., Niziński S., *Podstawy eksploatacji obiektów technicznych. Wydawnictwo Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie, Olsztyn 1997.*
[18] Moczarski M., *Kierunki rozwoju systemów remontów taboru kolejowego. Problemy Kolejnictwa, Warszawa 1976, nr 66, s. 99–130.*
[19] Moczarski M., *Nowe tendencje w obsłudze obiektów technicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, seria Maszyny Robocze i Pojazdy*, 1994, nr 41, s. 47–66.
[20] Niziński S., *Badania akustyczne stanu technicznego tłokowych silników spalinowych. Praca doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1975.*
[21] Orłowski Z., Gałka T., *System wibroakustycznej kontroli stanu technicznego turbin o mocy 200 MW. Prace Instytutu Energetyki, Warszawa 1991.*
[22] Pelc H., Raszkow J., *Opracowanie metody badań diagnostycznych silników spalinowych. Praca doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1973.*
[23] Pulwarski J., *Informatyczny system planowania remontów. Eksploatacja Maszyn*, 1977, nr 7, s. 9–11.
[24] Soboniak W., *Elastyczny model utrzymania ruchu. Eksploatacja Maszyn*, 1975, nr 2, s. 24–27.

- [25] Stelmaszyk Z., *Funkcjonalna metoda prognozowania stanu technicznego lotniczych silników turbinowych*. VII Szkoła Diagnostyki, Poznań-Rydzyna 1985, s. 255–264.
- [26] Śliwiński W., Gajek A., *Bieżąca kontrola stanu technicznego pojazdów w systemie planowo-zapobiegawczych obsłóg i napraw*. VIII krajowa konferencja naukowo-techniczna Diagnostyka pojazdów mechanicznych i maszyn roboczych, Piła 1989, s. 244–254.
- [27] Tomaszewski F. i zespół, *Analiza wpływu wybranych stanów silnika spalinowego a8C22 na zmiany sygnału wibroakustycznego*. Badania Statutowe, Politechnika Poznańska 1993, maszynopis.
- [28] Tomaszewski F. i zespół, *Badania wibroakustyczne wybranych zespołów lokomotyw manewrowych*. Badania Statutowe, Politechnika Poznańska 1992, maszynopis.
- [29] Tomaszewski F., *Badanie związków pomiędzy luzami elementów silnika a wybranymi estymatami sygnału WA*. Konferencja naukowa Diagnostyka maszyn roboczych i pojazdów94, Bydgoszcz 1994, s. 337–343.
- [30] Tomaszewski F., *Możliwości redukcji wektora sygnału z wykorzystaniem wskaźników niezawodności*. X Szkoła Diagnostyki – Diagnostics92, Poznań-Zajęczkowo 1992, s. 257–262.
- [31] Walaszek S., *Inspekcja urządzeń technicznych*. Eksploatacja Maszyn, 1977, nr 3, s. 1–2.
- [32] Walaszek S., *Wymiana zapobiegawcza z uwzględnieniem wieku urządzenia*. Eksploatacja Maszyn, 1977, nr 10, s. 3–4.
- [33] Widota A., *Diagnostyka obrabiarek i procesów oraz jej zastosowanie w ASO*. Mechanik, 1988, nr 4, s. 171–182.
- [34] Zamojski W., *Niezawodność i eksploatacja systemów*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1981.
-