

Zastosowanie adaptacyjnych metod prognozowania niezawodności w eksploatacji pojazdów szynowych

Opracowanie omawia metody, które mogą być zastosowane do prognozowania niezawodności pojazdów szynowych w stosowanych systemach eksploatacji. Prowadząc rozważania nad metodami prognozowania wskaźnika niezawodności pojazdów lądowych podjęto próby prognozowania z zastosowaniem wielomianów interpolacyjnych jako funkcji bazowych. Użycie tych wielomianów nie zawsze przynosiło pożądane rezultaty. W następnej kolejności wykonano prognozy z zastosowaniem zmodyfikowanych procedur dla programu MATLAB oraz funkcji wymiernych i aproksymacji za pomocą metody najmniejszych kwadratów. W wyniku przeprowadzonych testów oraz analizy błędów wyznaczono metodę za pomocą której uzyskano najdokładniejsze wyniki prognozowania wskaźnika niezawodności. Podany algorytm ułatwia aplikacje do monitorowania systemu eksploatacji.

Zastosowanie proponowanej metody w rzeczywistych systemach eksploatacji przyczynić się może do zwiększenia bezpieczeństwa użytkownika oraz poprawienia ekonomiki eksploatacji pojazdów szynowych.

Zagadnienie niezawodności dotyczy zarówno producentów jak i użytkowników wszystkich eksploatowanych pojazdów. Uwarunkowania rynkowe oraz duża konkurencja wśród producentów pojazdów spowodowały znaczne zwiększenie uwagi na jakość i niezawodność produkowanych oraz eksploatowanych pojazdów.

Zagadnienie, które omówione jest w niniejszym opracowaniu dotyczy bezpośrednio prognozy wskaźnika niezawodności pojazdów w określonych znanych systemach eksploatacji, oraz pośrednio dotyczy możliwości oceny jakości systemów eksploatacji i obsługi pojazdów lądowych.

Szybki rozwój techniki spowodował wprowadzenie do eksploatacji pojazdów nowoczesnych o dużych osiągnięciach i bardzo złożonej budowie. Efektywne eksploatowanie takich pojazdów stanowi bardzo złożony problem, którego rozwiązanie nie może być pozostawione subiektywnym poczynaniom personelu obsługującego. Jednym z najważniejszych i podstawowych problemów staje się unowocześnienie systemu eksploatacji pojazdów, w którym istotny wpływ na niezawodność ma racjonalnie zorganizowany proces obsługi technicznej. W nowym ujęciu obsługa techniczna oprócz profilaktyki, kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń winna zawierać również elementy prognozowania stanu technicznego eksploatowanych pojazdów.

Wychodząc naprzeciw wymienionym potrzebom podjęto próbę opracowania metody prognozowania niezawodności z wykorzystaniem danych niezawodnościowych z dotychczasowego okresu eksploatacji.

Prowadzone do tej pory badania niezawodności pojazdów w trakcie ich eksploatacji uwzględniały jedynie wyniki empiryczne, co w znacznym stopniu wydłużało czas badań. Zastosowanie metod probabilistycznych w badaniu niezawodności prowadzi do szybkiego otrzymania wystarczająco dokładnych wyników, które mogą być wykorzystane w trakcie projektowania i konstruowania pojazdów.

Największe możliwości oddziaływania na niezawodność pojazdów występują w fazie projektowania i konstruowania. Jednakże w praktyce możliwości te nie mogą być wykorzystane bez przeprowadzenia badań probabilistycznych oraz

empirycznych w trakcie eksploatacji. Również zapewnienie bezpieczeństwa czynnego i biernego jest podstawowym problemem w nowoczesnych systemach eksploatacji pojazdów. Dotychczasowe systemy nie prowadziły konsekwentnego rejestrowania danych eksploatacyjnych umożliwiającego śledzenie charakterystyk niezawodności. Natomiast poznanie charakterystyk niezawodnościowych ma podstawowe znaczenie dla procesu decyzyjnego w eksploatacji technicznej.

W celu otrzymania szybkiej i możliwie dokładnej oceny niezawodności oraz wprowadzenia jak najmniejszych zmian w systemie eksploatacji i obniżenia kosztów, w prezentowanej pracy przedstawiono metodę przewidywania niezawodności, która spełnia w dużym stopniu wymienione wcześniej warunki.

W wyniku realizacji badań przeprowadzono próby z zastosowaniem różnych procedur prognozowania wskaźnika niezawodności. Okazało się, że zastosowanie metody pseudoinwersji Moore'a - Penrose'a w większości przypadków nie dawało zadowalających rezultatów aproksymacji i prognozy. Zatem wykorzystanie do prognozowania wielomianów interpolacyjnych oparte na procedurach programu Matlab nie zawsze daje dobre rezultaty, ze względu na występowanie tzw. efektu Rungego (szybki wzrost błędów interpolacji w pobliżu krańców przedziału). Również nie wszystkie metody aproksymacji mogą znaleźć zastosowanie do rozwiązywania zadań związanych z prognozowaniem niezawodności pojazdów. Zastosowanie metody najmniejszych kwadratów w tym przypadku dało dobre wyniki. Pewnych wskazówek podczas budowy funkcji do prognozy może dostarczyć informacja na temat charakteru ekstrapolowanej funkcji - np. informacje o ekstremach, okresowości, monotoniczności, itp.

Poniżej przedstawiono propozycję budowy funkcji do prognozy wskaźników niezawodności pojazdów z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów oraz zaproponowanej formy wielomianu uogólnionego.

Metoda najmniejszych kwadratów jest często stosowaną metodą aproksymacji, zapewniającą dobre przybliżenie aproksymowanej funkcji wielomianem dowolnego stopnia, (omawiana jest w literaturze [1], [2], [3]). Charakteryzuje się

ona tym, że przybliżana funkcja zadana jest zbiorem dyskretnych wartości, obarczonych często błędami pomiaru. Zagadnienie aproksymacji średniokwadratowej można wówczas sformułować następująco:

Rozważamy funkcję określoną na dyskretnym zbiorze argumentów

$$f(x) = f(x_i), x_i \in \mathbf{X}, \quad (1)$$

\mathbf{X} - przestrzeń liniowa unormowana,
 $i = 1, 2, \dots, n$.

poszukujemy taką funkcję:

$$F(x_i) \in \mathbf{X} \quad (2)$$

o z góry zadanej postaci, aby wskaźnik jakości:

$$I = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - F(x_i)]^2 \quad (3)$$

osiągnął wartość minimalną. Jeżeli teraz założymy, że funkcja $F(x)$ zadana jest w postaci tzw. wielomianu uogólnionego w przestrzeni X_m ($X_m \subset X$), a:

$$F(x) = \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(x) \quad (4)$$

to widać, że minimum sumy (3) będzie zależec od współczynników a_i wielomianu uogólnionego. Wtedy zagadnienie najlepszej aproksymacji sprowadza się do znalezienia takich wartości współczynników a_i , aby suma (3) była minimalna. Zagadnienie to można rozwiązać przyrównując do zera pochodne cząstkowe z I liczone względem współczynników a_i :

$$\frac{\partial I}{\partial a_j} = 0, \quad j = 0, 1, \dots, m \quad (5)$$

Układ równań (5) stanowi tzw. układ normalny. Ponieważ funkcje $\varphi_j(x)$ tworzą bazę przestrzeni X_m , więc układ (5) ma wyznacznik różny od zera i rozwiązanie tego układu daje minimum sumy (3). Rozwiązanie układu (5) w zapisie macierzowym ma postać:

$$A = (D^T D)^{-1} D^T f \quad (6)$$

gdzie:

$A = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_m]^T$ - wektor poszukiwanych współczynników,
 $f = [f(x_0) \ f(x_1) \ \dots \ f(x_n)]^T$ - wektor wartości przybliżanej funkcji w punktach $x_0 \dots x_n$.

$$D = \begin{bmatrix} \varphi_0(x_0) & \dots & \varphi_m(x_0) \\ \dots & \dots & \dots \\ \varphi_0(x_n) & \dots & \varphi_m(x_n) \end{bmatrix}_{(m+1) \times (n+1)} \quad (7)$$

Wartości elementów macierzy D są wartościami funkcji bazowych φ_j w punktach x_i . Zauważymy też, że jako ciąg funkcji bazowych można przyjąć dowolny ciąg funkcji, określonych w przestrzeni X .

Ten fakt zostanie wykorzystany do budowy funkcji aproksymującej, która będzie też mogła być zastosowana do przewidywania wartości funkcji f poza przedziałem określonym przez $x_0 \dots x_n$. Przy wyborze funkcji bazowych przyjęto następujące założenia:

- należy wyznaczyć wartość funkcji $f(x)$ w punktach: $x_{n+1} \dots x_{n+p}$, $x_{n+1} > x_n$,
- przyjęta funkcja $F(x)$ ma być najlepszym w sensie minimalnokwadratowym przybliżeniem $f(x)$ w punktach $x_0 \dots x_n$,
- wiadomo, że funkcja $f(x)$ jest funkcją niezawodności, co jednoznacznie określa jej cechy: jest funkcja nierosnąca oraz przyjmująca wartości z przedziału $< 0; 1 >$. Ponadto znane są postacie analityczne funkcji niezawodności dla wielu sytuacji praktycznych. Są to np. funkcje wymierne lub wykładnicze.

Na podstawie analizy powyższych założeń oraz wcześniejszych badań symulacyjnych można stwierdzić, że najczęściej stosowane w aproksymacji średniokwadratowej ciągi funkcji bazowych w postaci: $\varphi_j(x) = x^j$ nie zawsze spełniają założenia dotyczące przebiegu funkcji niezawodności. Zostało to potwierdzone badaniami symulacyjnymi prowadzonymi z wykorzystaniem programu MATLAB.

W związku z powyższym zaproponowano jako ciąg funkcji bazowych wielomianu uogólnionego funkcje, które opisują funkcje niezawodności w najczęściej spotykanych przypadkach. Jedną z propozycji jest ciąg funkcji wymiernych mających postać następującą:

$$\varphi_j(x) = \frac{1}{x^j + p}, \quad p \in \mathbf{R}, \quad j = 0, 1, \dots, m \quad (8)$$

Z relacji (8) widać, że dla $p > 1$ każda funkcja $0 < \varphi_j(x) < 1$, czyli może ona opisywać niezawodność.

Niniejsze opracowanie prezentuje przykłady zastosowania proponowanego algorytmu prognozowania niezawodności na podstawie danych rzeczywistych uzyskanych w trakcie eksploatacji następujących pojazdów: „wagon platforma 424-Z”, „lokomotywa elektryczna EU-07”, „lokomotywa elektryczna ET-22”.

W trakcie przygotowywania danych rzeczywistych przyjęto stanowiące wielkości odstępu pomiędzy pomiarami, które w trakcie późniejszych badań posłużyły jako odpowiednie parametry przy budowie prognozy:

Typ pojazdu	Wartość parametru p
Wagon platforma 424-Z	5
Lokomotywa elektryczna EU-07	5
Lokomotywa elektryczna ET- 22	5

Uzyskane wyniki posłużyły do wyznaczenia metody prognozowania najbardziej przydatnej do prognozy niezawodności w systemach eksploatacji pojazdów szynowych oraz w większości znanych systemów eksploatacji pojazdów lądowych. Poniżej przedstawiano w formie wykresów przykłady wyników prognozowania z zastosowaniem opracowanej metody prognozowania niezawodności.

Wyniki badań rzeczywistych i prognozowania

Należy zaznaczyć, że każda z wykrytych usterek wagonów platform 424-Z eliminowała te pojazdy z dalszej eksploatacji. Natomiast uszkodzenia stwierdzone w lokomotywach powodowały konieczność ich usunięcia przed dalszym użytkowaniem pojazdu. Wyniki przeprowadzonych badań zamieszczono w tabelach.

Badając niezawodność określonego pojazdu szynowego jedną z zasadniczych czynności jest poznanie warunków jego eksploatacji. Analizując możliwości prowadzenia badań niezawodnościowych dla celów niniejszej pracy, zdecydowa-

no że do testowania proponowanej metody prognozowania niezawodności wykorzystane zostaną wyniki badań wagonów towarowych typu platforma 424-Z, oraz lokomotyw elektrycznych EU-07 i ET-22.

WAGON PLATFORMA TYP 424-Z

Badania wykonane w rzeczywistym systemie eksploatacji wagonu platformy typu 424-Z. W celu testowania metody wykorzystano wyniki badań uszkodzeń łożysk osi kół wagonów dla zakresu czasu przebiegu eksploatacji 265–500 dni.

Wyniki badań empirycznych wagonu kolejowego 424-Z.

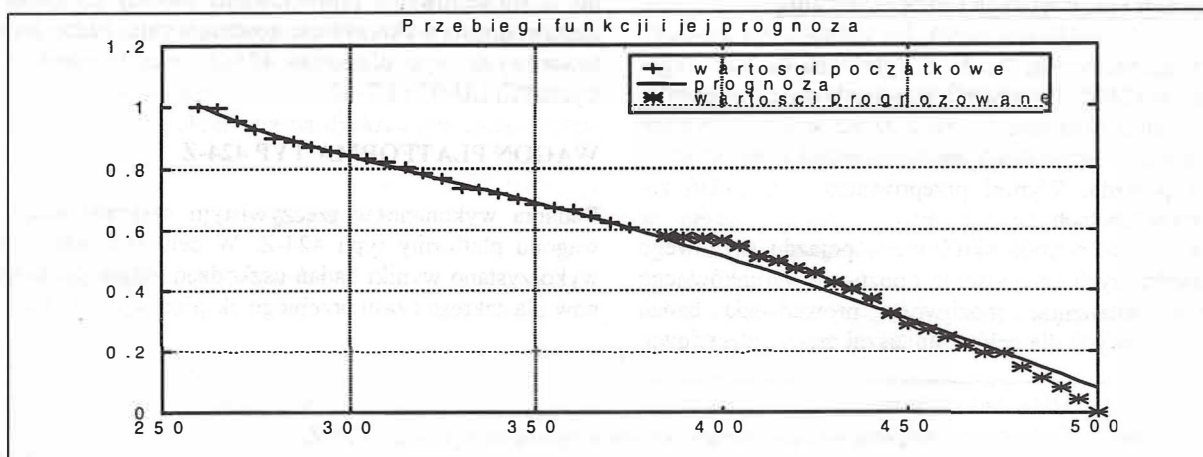
Tabela 1

LICZBA WAGONÓW OGÓŁEM 342	RZECZYWISTE WARTOŚCI WSKAŹNIKA NIEZAWODNOŚCI [R] WAGONU KOLEJOWEGO TYPU 424-Z										
PRZEBIEG W DNIACH	0	265	270	275	280	285	290	295	300	305	310
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	0	2	16	26	35	39	45	49	54	58	62
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	1,0000	0,9942	0,9532	0,9240	0,8977	0,8860	0,8684	0,8567	0,8421	0,8304	0,8187
PRZEBIEG W DNIACH	315	320	325	330	335	340	345	350	355	360	365
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	67	73	80	90	92	96	102	109	112	115	122
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,8041	0,7865	0,7661	0,7368	0,7310	0,7193	0,7018	0,6813	0,6725	0,6637	0,6433
PRZEBIEG W DNIACH	370	375	380	385	390	395	400	405	410	415	420
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	129	135	139	145	146	147	150	156	167	172	181
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,6228	0,6053	0,5936	0,5760	0,5731	0,5702	0,5614	0,5439	0,5117	0,4971	0,4708
PRZEBIEG W DNIACH	425	430	435	440	445	450	455	460	465	470	475
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	185	196	204	215	231	243	249	258	267	276	276
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,4591	0,4269	0,4035	0,3713	0,3246	0,2895	0,2719	0,2456	0,2193	0,1930	0,1930
PRZEBIEG W DNIACH	480	485	490	495	500	—	—	—	—	—	—
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	292	304	314	327	342	—	—	—	—	—	—
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,1462	0,1111	0,0819	0,0439	0,0000	—	—	—	—	—	—

Przedstawione rysunki prezentują przykłady wyników, które uzyskano używając do prognozy wielomianów interpolacyjnych. Uwidaczniają one rzeczywiste wartości wskaźnika niezawodności, przebieg aproksymowanej funkcji oraz jej prognozę.

Przykłady przedstawiają prognozy z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów i funkcji wymiernych dla zmodyfikowanych procedur programu Matlab, które w wystarczająco dokładny sposób opisują funkcję niezawodności pojazdów.

Wyznaczenie prognozy wskaźnika niezawodności wagonu platformy typu 424-Z uzyskanej z zastosowaniem do aproksymacji funkcji niezawodności metody najmniejszych kwadratów natomiast jako funkcje bazowe użyto funkcji wymiernych.



Rys. 1. Wskaźnik niezawodności w funkcji czasu eksploatacji oraz jego prognoza dla wagonu kolejowego typu platforma 424-Z.

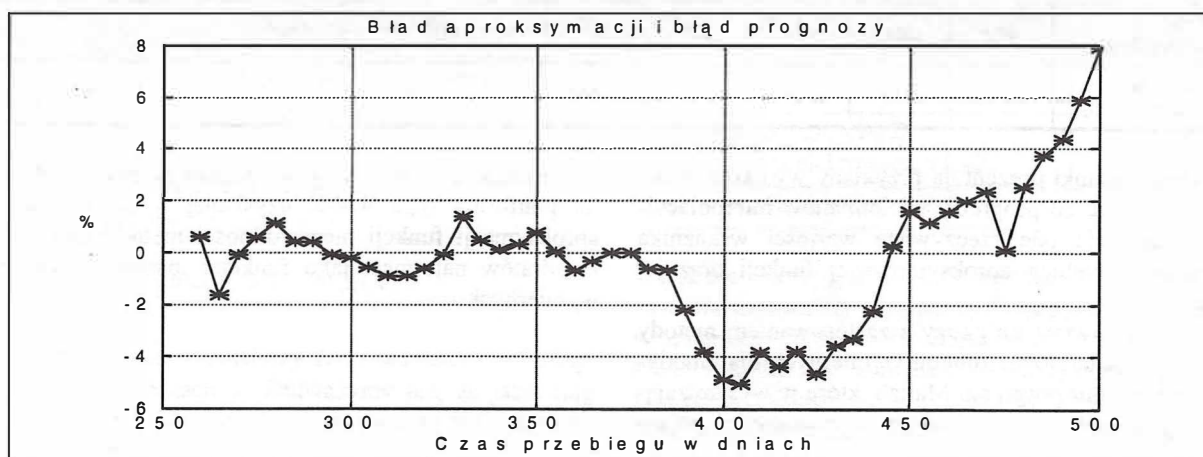
Porównanie wartości funkcji aproksymującej i wykonanej prognozy z rzeczywistym przebiegiem wskaźnika niezawodności umożliwia wyznaczenie błędów aproksymacji i prognozy wskaźnika niezawodności.

Wyliczone wartości błędów zawiera poniższa tabela, natomiast przebieg błędów prognozy przedstawiony jest na wykresie.

Wartości błędów prognozy wskaźnika niezawodności wagonu kolejowego 424-Z.

Tabela 2

WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY WSKAŹNIKA NIEZAWODNOŚCI WAGONU KOLEJOWEGO TYPU PLATFORMA 424-Z											
PRZEBIEG W DNIACH	0	26R5	270	275	280	285	290	295	300	305	310
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	0,6167	-1,6523	-0,0817	0,5686	1,1378	0,4135	0,4095	-0,0844	-0,2135	-0,5793	-0,9095
PRZEBIEG W DNIACH	315	320	325	330	335	340	345	350	355	360	365
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	-0,9289	-0,6399	-0,0724	1,3751	0,4561	0,1052	0,3082	0,7817	0,0535	-0,7083	-0,3448
PRZEBIEG W DNIACH	370	375	380	385	390	395	400	405	410	415	420
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	-0,0067	-0,0043	-0,6174	-0,6756	-2,2385	-3,8351	-4,8746	-5,0758	-3,8375	-4,3886	-3,7977
PRZEBIEG W DNIACH	425	430	435	440	445	450	455	460	465	470	475
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	-4,6935	-3,5646	-3,3396	-2,2573	0,2539	1,5853	1,1482	1,5638	1,9636	2,3488	0,0905
PRZEBIEG W DNIACH	480	485	490	495	500	—	—	—	—	—	—
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	2,5000	3,7284	4,3568	5,8564	7,9380	—	—	—	—	—	—



Rys. 2. Wykres błędów prognozy wskaźnika niezawodności dla wagonu kolejowego typu platforma 424-Z.

LOKOMOTYWA ELEKTRYCZNA TYP EU-07

Badania niezawodności wykonane w rzeczywistym systemie eksploatacji lokomotywy elektrycznej typu EU-07. Dla celów

testowania metody wykorzystano wyniki badań granicznego zużycia powierzchni toczyńnych zestawów kołowych w zakresie czasu przebiegu eksploatacji 120–340 dni.

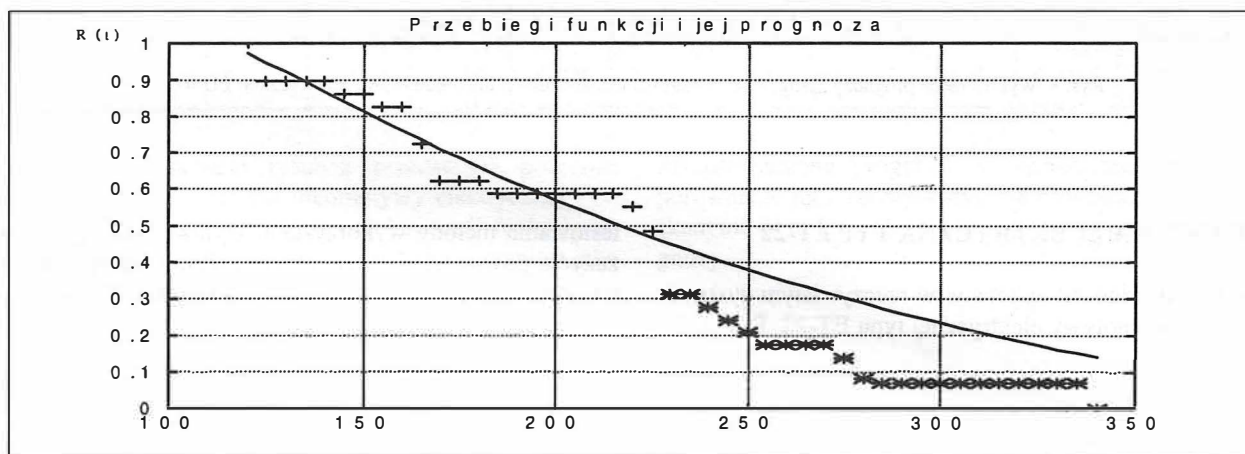
Wyniki badań empirycznych lokomotywy elektrycznej EU-07.

Tabela 3.

LICZBA LOKOMOTYW OGÓLEM 29	RZECZYWISTE WARTOŚCI WSKAŹNIKA NIEZAWODNOŚCI [R] LOKOMOTYWY ELEKTRYCZNEJ EU-07										
	PRZEBIEG W DNIACH	0	120	125	130	135	140	145	150	155	160
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	0	3	3	3	3	4	4	5	5	8	11
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	1,0000	0,8966	0,8966	0,8966	0,8966	0,8621	0,8621	0,8276	0,8276	0,7241	0,6207
PRZEBIEG W DNIACH	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	11	11	12	12	12	12	12	12	12	13	15
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,6207	0,6207	0,5862	0,5862	0,5862	0,5862	0,5862	0,5862	0,5862	0,5862	0,5517
PRZEBIEG W DNIACH	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	20	20	21	22	23	24	24	24	24	25	27
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,4828	0,3103	0,3103	0,2759	0,2414	0,2069	0,1724	0,1724	0,1724	0,1724	0,1379
PRZEBIEG W DNIACH	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325	330
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690
PRZEBIEG W DNIACH	335	340	—	—	—	—	—	—	—	—	—
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	27	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,0690	0,0000	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Zamieszczony poniżej rysunek przedstawia prognozę wskaźnika niezawodności dla lokomotywy elektrycznej EU-07 uzyskanej z zastosowaniem do aproksymacji funkcji niezawodności metody najmniejszych kwadratów natomiast jako funkcji bazowych użyto funkcje wymierne.

Przeprowadzono prognozę wskaźnika niezawodności oraz porównanie jej z rzeczywistymi wartościami wskaźnika uzyskanymi w trakcie eksploatacji pojazdu po wykonaniu prognozy.



Rys. 3. Wskaźnik niezawodności w funkcji czasu eksploatacji oraz jego prognoza dla lokomotywy elektrycznej EU-07.

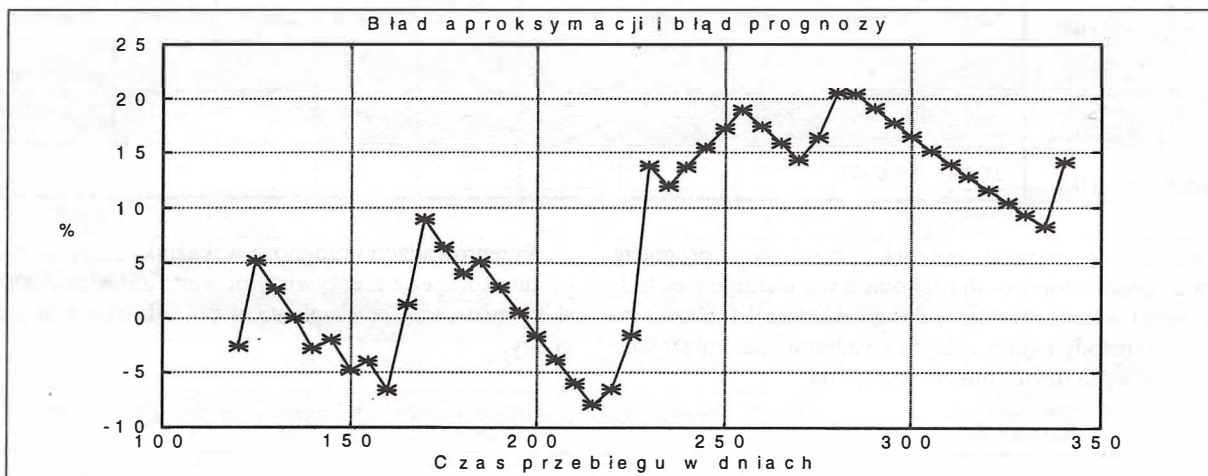
Porównanie wartości funkcji aproksymującej i wykonanej prognozy z rzeczywistym przebiegiem wskaźnika niezawodności umożliwia wyznaczenie błędu aproksymacji i prognozy wskaźnika niezawodności.

Wyliczone wartości błędów zawiera poniższa tabela, natomiast przebieg błędu prognozy przedstawiony jest na wykresie.

Wartości błędów prognozy wskaźnika niezawodności lokomotywy elektrycznej EU-07.

Tabela 4

WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY WSKAŹNIKA NIEZAWODNOŚCI LOKOMOTYWY ELEKTRYCZNEJ EU-07											
PRZEBIEG W DNIACH	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	-2,6503	5,1926	2,5883	-0,0810	-2,7831	-2,0435	-4,7432	-3,9683	-6,6080	1,1455	8,9380
PRZEBIEG W DNIACH	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	6,4436	4,0051	5,0742	2,7518	0,4883	-1,7166	-3,8633	-5,9526	-7,9857	-6,5138	-1,5480
PRZEBIEG W DNIACH	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275	280
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	13,8300	12,0091	13,6775	15,4039	17,1768	18,9946	17,4060	15,8596	14,3538	16,3374	20,4890
PRZEBIEG W DNIACH	285	290	295	300	305	310	315	320	325	330	335
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	20,4074	19,0514	17,7296	16,4410	15,1845	13,9589	12,7633	11,5966	10,4579	9,3463	8,2608
PRZEBIEG W DNIACH	340	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	14,1006	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—



Rys. 4. Wykres błędów prognozy „prog2504” wskaźnika niezawodności dla lokomotywy elektrycznej EU-07.

LOKOMOTYWA ELEKTRYCZNA TYP ET-22

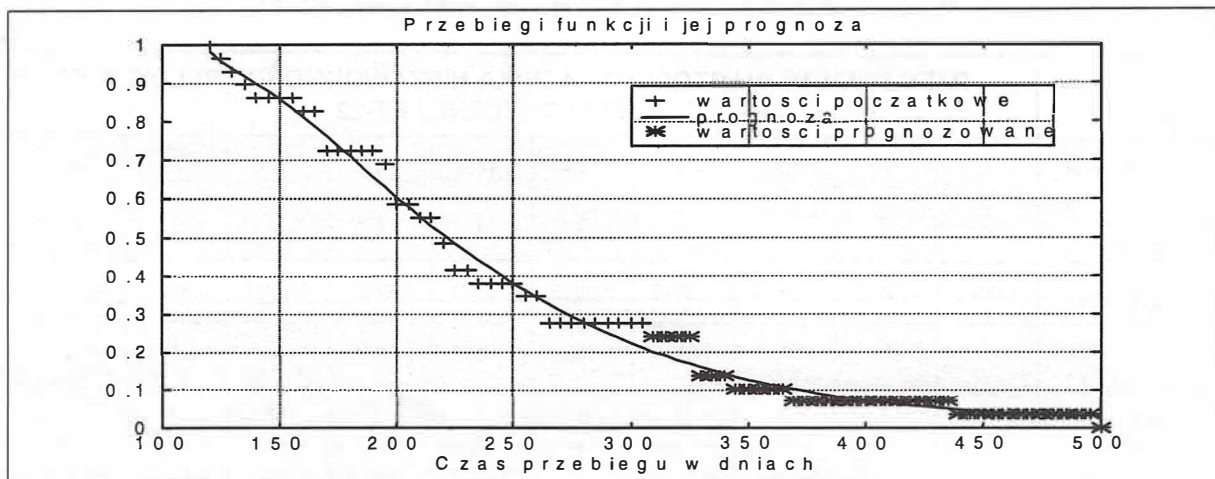
Badania niezawodności wykonane w rzeczywistym systemie eksploatacji lokomotywy elektrycznej typu ET-22. Dla celów

testowania metody wykorzystano wyniki badań granicznego zużycia powierzchni toczonej zestawów kołowych w zakresie czasu przebiegu eksploatacji 120–500 dni.

LICZBA LOKOMOTYW OGÓŁEM 29	RZECZYWISTE WARTOŚCI WSKAŹNIKA NIEZAWODNOŚCI [R] LOKOMOTYWY ELEKTRYCZNEJ ET-22										
	0	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165
PRZEBIEG W DNIACH	0	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	0	0	1	2	3	4	4	4	4	5	5
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	1,0000	1,0000	0,9655	0,9310	0,8966	0,8621	0,8621	0,8621	0,8621	0,8276	0,8276
PRZEBIEG W DNIACH	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	8	8	8	8	8	9	12	12	13	13	15
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,7241	0,7241	0,7241	0,7241	0,7241	0,6897	0,5862	0,5862	0,5517	0,5517	0,4828
PRZEBIEG W DNIACH	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	17	17	18	18	18	18	19	19	21	21	21
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,4138	0,4138	0,3793	0,3793	0,3793	0,3793	0,3448	0,3448	0,2759	0,2759	0,2759
PRZEBIEG W DNIACH	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325	330
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	21	21	21	21	21	21	22	22	22	22	25
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,2759	0,2759	0,2759	0,2759	0,2759	0,2759	0,2414	0,2414	0,2414	0,2414	0,1379
PRZEBIEG W DNIACH	335	340	345	350	355	360	365	370	375	380	385
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	25	25	26	26	26	26	26	27	27	27	27
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,1379	0,1379	0,1034	0,1034	0,1034	0,1034	0,1034	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690
PRZEBIEG W DNIACH	390	395	400	405	410	415	420	425	430	440	445
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	27	27	27	27	27	27	27	27	27	28	28
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0690	0,0345
PRZEBIEG W DNIACH	450	455	460	465	470	475	480	485	490	495	500
LICZNOŚĆ USZKODZONYCH POJ.	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	29
WSKAŹNIK NIEZAWODNOŚCI [R]	0,0345	0,0345	0,0345	0,0345	0,0345	0,0345	0,0345	0,0345	0,0345	0,0345	0,0000

Zamieszczony poniżej rysunek przedstawia prognozę wskaźnika niezawodności dla lokomotywy elektrycznej EU-07 uzyskanej z zastosowaniem do aproksymacji funkcji niezawodności metody najmniejszych kwadratów natomiast jako funkcji bazowych użyto funkcje wymierne.

Przeprowadzono prognozę wskaźnika niezawodności oraz porównanie jej z rzeczywistymi wartościami wskaźnika uzyskanymi w trakcie eksploatacji pojazdu po wykonaniu prognozy.



Rys. 5. Wskaźnik niezawodności w funkcji czasu eksploatacji oraz jego prognoza „prog2504” dla lokomotywy elektrycznej ET-22.

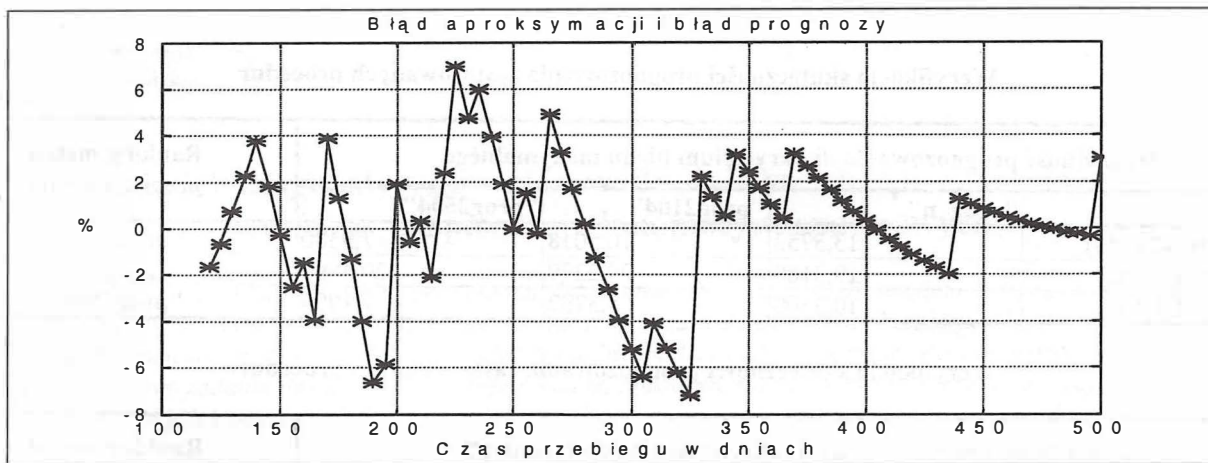
Porównanie wartości funkcji aproksymującej i wykonanej prognozy z rzeczywistym przebiegiem wskaźnika niezawodności umożliwia wyznaczenie błędu aproksymacji i prognozy wskaźnika niezawodności.

Wyliczone wartości błędów zawiera poniższa tabela, natomiast przebieg błędu prognozy przedstawiony jest na wykresie.

Wartości błędów prognozy wskaźnika niezawodności lokomotywy elektrycznej ET-22.

Tabela 6

WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY WSKAŹNIKA NIEZAWODNOŚCI LOKOMOTYWY ELEKTRYCZNEJ ET-22											
PRZEBIEG W DNIACH	0	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	-1,6499	-0,6711	0,7259	2,2539	3,7949	1,7949	-0,3246	-2,5699	-1,4819	-3,9432	3,8674
PRZEBIEG W DNIACH	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	1,2719	-1,3585	-4,0042	-6,6476	-5,8335	1,9211	-0,6328	0,3138	-2,1319	2,3759	6,9617
PRZEBIEG W DNIACH	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	4,7186	5,9989	3,9040	1,8847	-0,0589	1,5228	-0,2710	4,8988	3,2506	1,6730	0,1642
PRZEBIEG W DNIACH	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325	330
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	-1,2777	-2,6545	-3,9682	-5,2209	-6,4147	-4,1015	-5,1834	-6,2125	-7,1906	2,2301	1,3480
PRZEBIEG W DNIACH	335	340	345	350	355	360	365	370	375	380	385
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	0,5110	3,1674	2,4155	1,7035	1,0299	0,3930	3,2313	2,6634	2,1278	1,6231	1,1482
PRZEBIEG W DNIACH	390	395	400	405	410	415	420	425	430	435	440
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	0,7016	0,2823	-0,1110	-0,4794	-0,8239	-1,1455	-1,4453	-1,7242	-1,9830	1,2274	1,0061
PRZEBIEG W DNIACH	445	450	455	460	465	470	475	480	485	490	495
WARTOŚCI BŁĘDU PROGNOZY [%]	0,8024	0,6155	0,4446	0,2892	0,1485	0,0218	-0,0913	-0,1916	-0,2795	-0,3556	3,0296



Rys. 6. Wykres błędu prognozy „prog2504” wskaźnika niezawodności dla lokomotywy elektrycznej ET-22.

Analiza dokładności wyników prognozowania

Zestawienie różnic wynikających z porównania pomiędzy prognozowanymi wartościami wskaźnika niezawodności i wartościami rzeczywistymi otrzymanymi w trakcie badania pojazdów, doprowadziło do obliczenia błędów pro-

gnozowania w kolejnych przedziałach eksploatacji pojazdów. W celu porównania dokładności prognozowania testowanych procedur, wyznaczono maksymalny błąd prognozy oraz średni błąd prognozy z całego zakresu prognozowania dla każdej z procedur. Otrzymane wyniki wykorzystano do dalszej analizy skuteczności prognozowania testowanych procedur.

Błędy prognozowania z zastosowaniem procedur „prog_n”, „prog2104”, „prog2504” dla pojazdów szynowych.

Tabela 7

Czas (dni)	Błąd prognozy dla W-424 (%)			Czas (dni)	Błąd prognozy dla EU-07 (%)			Czas (dni)	Błąd prognozy dla ET-22 (%)		
	"prog_n"	"prog2104"	"prog2504"		"prog_n"	"prog2104"	"prog2504"		"prog_n"	"prog2104"	"prog2504"
375	0,0639	0,3761	0,6174	230	2,7560	18,0397	13,8300	310	1,3800	2,4469	4,1015
380	0,6795	0,3786	0,6756	235	17,5930	16,6557	12,0091	315	0,6900	3,4639	5,1834
385	0,9193	1,8811	2,2385	240	15,1800	18,7595	13,6775	320	0,0000	4,4407	6,2125
390	2,7156	3,4127	3,8351	245	16,2070	20,9187	15,4039	325	0,6900	5,3792	7,1906
395	4,5984	4,3829	4,8746	250	17,2440	23,1210	17,1768	330	8,9700	4,0688	2,2301
400	5,9775	4,5105	5,0758	255	18,2810	25,3645	18,9946	335	8,2800	3,2017	1,3480
405	6,5731	3,1946	3,8375	260	19,3180	24,1972	17,4060	340	7,5900	2,3678	0,5110
410	5,7852	3,6642	4,3886	265	16,9050	23,0672	15,8596	345	10,3500	5,0157	3,1674
415	6,8437	2,9880	3,7977	270	14,4920	21,9729	14,3538	350	9,6600	4,2439	2,4155
420	6,8186	3,7949	0,4694	275	12,0790	24,3625	16,3374	355	8,9700	3,5010	1,7035
425	8,3400	2,5736	3,5946	280	13,1160	28,9147	20,4890	360	8,2800	2,7859	1,0299
430	7,8978	2,2530	3,3396	285	16,2830	29,2279	20,4074	365	7,5900	2,0972	0,3930
435	8,4220	1,0719	2,2573	290	15,1800	28,2608	19,0514	370	10,3400	4,8737	3,2313
440	8,1527	1,5411	0,2539	295	12,7670	27,3221	17,7296	375	9,6500	4,2344	2,6634
445	6,5198	2,9770	1,5853	300	10,3540	26,4106	16,4410	380	9,9600	3,6182	2,1278
450	6,1334	2,6472	1,1482	305	7,9410	25,5252	15,1845	385	8,2700	3,0242	1,6231
455	7,5834	3,1727	1,5638	310	5,5280	24,6648	13,9589	390	7,5800	2,4512	1,1482
460	8,2498	3,6847	1,9636	315	3,1150	23,8283	12,7633	395	6,8900	1,8986	0,7016
465	9,0027	4,1844	2,3488	320	0,7020	23,0147	11,5966	400	6,2000	1,3653	0,2823
470	9,8420	2,0428	0,0905	325	1,7110	22,2233	10,4579	405	5,5100	0,8505	0,1110
475	13,3978	4,5710	2,5000	330	4,1240	21,4530	9,3463	410	4,8200	0,3536	0,4794
480	12,3600	5,9200	3,7284	335	6,5370	20,7031	8,2608	415	4,1300	0,1263	0,8239
485	12,5786	6,6708	4,3568	340	8,9500	26,8727	14,1006	420	3,4400	0,5898	1,1455
490	3,4737	8,2945	5,8564					425	2,7500	1,0376	1,4453
495	13,5752	10,5018	7,9380					430	2,0600	1,4705	1,7242
								435	1,3700	1,8889	1,9830
								440	4,1300	1,1566	1,2274
								445	3,4400	0,7653	1,0061
								450	2,7500	0,3869	0,8024
								455	2,0600	0,0206	0,6155
								460	1,3700	0,3338	0,4446
								465	0,6800	0,6769	0,2892
								470	0,0100	1,0091	0,1485
								475	0,7000	1,3308	0,0218
								480	1,3900	1,6425	0,0913
								485	2,0800	1,9444	0,1916
								490	2,7700	2,2370	0,2795
								495	3,4600	2,5206	0,3556
								500	0,7000	0,6544	3,0296
Błąd max.	13,5752	10,5018	7,9380		19,3180	29,2279	20,4890		10,3500	5,3792	7,1906
Błąd średni	7,0601	3,6276	2,8934		11,0413	22,1819	14,2273		4,6144	2,1917	1,6277

Weryfikacja skuteczności prognozowania zastosowanych procedur

Tabela 8

Dokładność prognozowania dla kryterium błędu maksymalnego				Ranking metod prognozowania
	"prog_n"	"prog2104"	"prog2504"	
Bł.max.W-424 (%)	13,5752	10,5018	7,9380	"prog2504"
Bł.max.L-EU (%)	19,3180	29,2279	20,4890	"prog_n"
Bł.max.L-ET (%)	10,3500	5,3792	7,1906	"prog2104"

Weryfikacja skuteczności prognozowania zastosowanych procedur

Tabela 9

Dokładność prognozowania dla kryterium błędu średniego				Ranking metod prognozowania
	"prog_n"	"prog2104"	"prog2504"	
Bł.śred.W-424 (%)	7,0601	3,6276	2,8934	"prog2504"
Bł.śred. L-EU (%)	11,0413	22,1819	14,2273	"prog_n"
Bł.śred. L-ET (%)	4,6144	2,1917	1,6277	"prog2504"

Uwagi końcowe

Na podstawie analizy wyników obliczeniowych pokazanych powyżej można stwierdzić, że w przypadku pojazdów szynowych proponowany algorytm prognozy wskaźnika niezawodności pozwala przewidzieć zachowanie się tego wskaźnika z błędem nie przekraczającym 20,49% dla wyznaczonego błędu maksymalnego, co można uznać za wynik zadowalający. W przypadku średniego błędu prognozy jest on mniejszy i zawiera się w zakresie 1,62 do 14,22%, przy czym należy zwrócić uwagę, że w tym przypadku wartości błędów znacznie wyraźniej wskazują na charakter przebiegu przewidywanego wskaźnika niezawodności i mają jakościowo nieco inny charakter, niż w przypadku błędu maksymalnego.

Opracowane metody prognozowania niezawodności eksploatowanych pojazdów stanowią istotny element zagadnienia zapewnienia jakości i niezawodności związany z wymaganiami normy ISO 9000. Zaletą omówionych metod jest ich uniwersalność i możliwość zastosowania w większości znanych systemów eksploatacji. Natomiast powstałe w trakcie

przeprowadzonych badań bazy danych i zawarte w nich informacje eksploatacyjne posłużyć mogą do prowadzenia dalszych badań w celu znalezienia przyczyn powstawania uszkodzeń i wykrycia słabych ogniw w konstrukcjach pojazdów.

Literatura

- [1] Allgower E., Georg K., *Numerical Continuation Methods, an Introduction*.
- [2] Box G.E.P., Jenkins G.M., *Analiza szeregów czasowych*, PWN, Warszawa 1983.
- [3] Fortuna Z., Macukow B., Wasowski J., *Metody Numeryczne*, WNT, Warszawa 1993.
- [4] Mathews J. H., *Numerical Methods for Mathematics, Science and Engineering*, Prentice-Hall USA, 1992.
- [5] Oprędkiewicz J., *Wspomaganie komputerowe w niezawodności maszyn, CAD/CAM*, WNT, Warszawa 1993.