mgr inż. Adrian Gill
Politechnika Poznańska

Metoda wyznaczania struktury cyklu napraw elementów pojazdów szynowych

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania struktury cyklu napraw elementów pojazdów szynowych, wykorzystującą koncepcję techniczno-ekonomicznej metody ustalania optymalnego okresu międzynaprawczego. Przyjęto założenie o krotności okresów między naprawami. Zastosowano metodę programowania dynamicznego w poszukiwaniu rozwiązań optymalnych. Przedstawiono przykład wyznaczania optymalnej struktury cyklu napraw elementów pojazdów szynowych.

1. Wprowadzenie

Zapewnienie odpowiedniej niezawodności działania obiektów technicznych jest naczelnym zadaniem ich eksploatatora. Przyjmuje się, że już producent urządzenia powinien dążyć do wytworzenia wyrobów o optymalnej niezawodności. Praktycznie jednak zabiegi o utrzymanie obiektu w stanie zdatności stają się domeną systemu eksploatacji [3]. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w przypadku systemów eksploatacji złożonych i kosztownych urządzeń o istotnym znaczeniu dla procesu produkcji, czy takich, których uszkodzenie może być przyczyną zagrożenia bezpieczeństwa ludzi.

Aby zmniejszyć ryzyko związane z uszkodzeniami obiektu przeprowadza się obsługi profilaktyczne. Obsługiwanie profilaktyczne podnosi współczynnik gotowości obiektu, ale jednocześnie zwiększa koszty eksploatacyjne o koszty czynności obsługowych. Według autorów pracy [5] racjonalna polityka eksploatacyjna powinna przeciwdziałać uszkodzeniom, przewidywać liczbę uszkodzeń, których nie uda się zapobiec i usuwać skutki uszkodzeń przez naprawę lub wymianę urządzeń na nowe przy możliwie najmniejszych nakładach. Sposobem realizacji takiej polityki są odpowiednio dobrane metody obsługiwania. Systemy eksploatacji pojazdów szynowych są w większości oparte na planowo-zapobiegawczej metodzie obsługiwania [10]. Taki sposób organizacji działalności obsługowej powoduje, że pojazd często kierowany jest do obsługi wcześniej niż wynikałoby to z fizycznego zużycia jego elementów [6]. Ponadto koszty utrzymania pojazdu w stanie zdatności, ze względu na koszty skutków uszkodzeń jakie występują między obsługami planowanymi, dodatkowo wzrastają [10]. Istotną zaletą metody planowo-zapobiegawczej jest natomiast łatwość sterowania procesami eksploatacji [6].

Efektywność pracy systemu eksploatacji pojazdów może być wyższa m.in. po zoptymalizowaniu pewnych zmiennych, które charakteryzują ten system. System eksploatacji według autora pracy [4], można traktować jako punkt w wielowymiarowej przestrzeni euklidesowej. Zbiór współrzędnych tego punktu dzieli się na dwa podzbiory. Jeden ze podzbiorów to zmienne zwane parametrami (zmienne te przyjmowane są za stałe w procesie konstruowania systemu eksploatacji). Drugi zbiór to tzw. zmienne decyzyjne, których wartości kształtowane są w procesie konstruowania systemu. W metodzie wyznaczania struktury cyklu napraw elementów pojazdów szynowych jako parametry przyjęto koszty napraw poszczególnych elementów pojazdu szynowego oraz resurs elementu. Resurs elementu będzie rozumiany jako liczba jednostek pracy pojazdu wyrażona przebiegiem, po której należy przeprowadzić określony typ obsługi [8]. Jako zmienne decyzyjne przyjęto przebiegi do naprawy poszczególnych elementów pojazdu szynowego.

W celu znalezienia rozwiązania optymalnego zastosowano metodę programowania dynamicznego. Istotą tej metody jest założenie, że „strategia jest optymalna, jeżeli dla dowolnego stanu początkowego i dowolnej decyzji początkowej, decyzje następne tworzą politykę optymalną w odniesieniu do stanu wynikającego z podjęcia pierwszej decyzji"[9].

Celem artykułu jest przedstawienie propozycji metody wyznaczania optymalnej struktury cyklu napraw obiektów technicznych na przykładzie pojazdów szynowych.

2. Wyznaczanie optymalnego okresu między naprawami elementów pojazdów szynowych

W dowolnym obiekcie technicznym łączne koszty związane z odbudową potencjału eksploatacyjnego jego N elementów można wyrazić zależnością [1]:

$$z(l_1, l_2, \ldots, l_N) = \sum_{i=1}^{N} \frac{C_i}{l_i}, \quad 0 < l_i \le L_i, \; i = 1, 2, \ldots, N, \qquad (1)$$

gdzie:

- C_i – koszt odnowy potencjału eksploatacyjnego i-tego elementu [zł],
- l_i – przebieg między naprawami i-tego elementu [km],
- L_i – liczba jednostek pracy (jp) elementu, po której należy przeprowadzić określony typ obsługi (90% γ-resurs i-tego elementu) [km].

Jeżeli zbiór przebiegów do naprawy poszczególnych elementów obiektu uszeregować według rosnących resursów tj. $L_1 \le L_2 \le \ldots \le L_N$ to na ogół obowiązuje zasada, że resurs międzyobsługowy obsługi wyższego rzędu jest wielokrotnością resursu obsługi niższego rzędu [2]. Przebiegi do naprawy poszczególnych elementów, zachowując krotności, można zatem wyrazić za pomocą następujących zależności:

$$\begin{aligned} l_2 &= a_2 l_1; \\ l_3 &= a_3 l_2 = a_3 a_2 l_1; \\ &\ldots \\ l_i &= a_i a_{i-1} \ldots a_2 l_1; \\ &\ldots \\ l_N &= a_N a_{N-1} \ldots a_2 l_1. \end{aligned} \qquad (2)$$

gdzie:

i – jest identyfikatorem elementu wynikającym z kolejności w szeregu pozycyjnym utworzonym z 90% γ-resursów,

a_i $(i = 1,2,\ldots,N)$ – jest współczynnikiem krotności okresu między naprawami, $a_i \in \mathbf{N}$.

Funkcji określonej zależnością (1) można nadać znaczenie funkcji celu i uwzględniając wzory (2) zapisać w postaci:

$$z(l_1, a_2, a_3, \ldots, a_N) = \sum_{i=1}^{N} \frac{C_i}{a_i a_{i-1} \ldots a_2 l_1}, \tag{3}$$

gdzie:

$$0 < l_1 \le L_1, \tag{4}$$

$$0 < a_i a_{i-1} \ldots a_2 l_1 \le L_i. \tag{5}$$

Ograniczenia (4) i (5) są funkcjami liniowymi natomiast funkcja celu jest nieliniowa. Problem wyznaczenia optymalnej struktury cyklu napraw można rozwiązać metodami nieliniowego programowania matematycznego.

Przyjmuje się, że przebieg do naprawy pierwszego elementu l_1 jest równy wyznaczanemu okresowi między naprawami.

Jeżeli przez $q_i(l_i)$ oznaczyć jednostkowy koszt naprawy i-tego elementu po wykonaniu pracy mierzonej przebiegiem l_i, to wzór (3) można zapisać następująco:

$$z(l_1, a_2, a_3, \ldots, a_N) = \sum_{i=1}^{N} q_i(l_i). \tag{6}$$

Oznaczając zatem przez z^* minimum funkcji celu łącznych jednostkowych kosztów związanych z odbudową potencjalu eksploatacyjnego N elementów, uwzględniając zależność (6), można napisać, że:

$$z^*(l_1, a_2, a_3, \ldots, a_N) = \min_{l_1 \in \Lambda_1, \ldots, l_N \in \Lambda_N} \left\{ \sum_{i=1}^{N} q_i(l_i) \right\}, \tag{7}$$

gdzie Λ_i – jest zbiorem możliwych przebiegów do naprawy i-tego elementu.

Przebieg do naprawy pierwszego elementu l_1 jest daną wyjściowa. Na jego podstawie, stosując zasadę krotności, oblicza się możliwe przebiegi do naprawy pozostałych elementów. Przykładowo, dla elementu trzeciego (i=3) przy współczynnikach krotności a_2=2 i $a_3 \in \{1,2,3\}$ otrzymuje się zgodnie z zależnościami (2) trzy możliwe przebiegi do naprawy: $l_3=2l_1$, $l_3=4l_1$, $l_3=6l_1$. Przebieg do naprawy pierwszego elementu przyjmuje wartości z przedziału $\langle 0, L_1 \rangle$ i nie zależy od przebiegów do naprawy pozostałych elementów.

Zgodnie z metodyką programowania dynamicznego przedstawioną m.in. w pracy [7], wyznaczanie wartości funkcji celu należy rozpocząć od elementu ostatniego tj. elementu o identyfikatorze $i=N$. Łączny jednostkowy koszt naprawy elementów o identyfikatorach $i=1,2,\ldots N$ będzie sumą minimalnych łącznych kosztów naprawy elementów $i=i+1$ dla wyznaczonego okresu między naprawami. Rozpoczynając wyznaczanie optymalnego okresu między naprawami od elementu i=2 można zapisać, że:

$$z(l_1, a_2, a_3, \ldots, a_N) = \min_{l_2 \in \Lambda_2, \ldots, l_N \in \Lambda_N} \left\{ \sum_{i=1}^{N} q_i(l_i) \right\} = q_1(l_1) + \min_{l_2 \in \Lambda_2, \ldots, l_N \in \Lambda_N} \left\{ \sum_{i=2}^{N} q_i(l_i) \right\} \tag{8}$$

Składnik zależności (8) związany z jednostkowymi kosztami naprawy elementu 1 (elementu o najmniejszym resursie) nie jest minimalizowany, ponieważ jest wartością wyjściową i nie zależy tym samym od przebiegów do naprawy $l_2, l_3, \ldots, l_N$.

Jeżeli przyjmie się, że

$$\min_{l_2 \in \Lambda_2, \ldots, l_N \in \Lambda_N} \left\{ \sum_{i=2}^{N} q_i(l_i) \right\} = u_2(l_2), \tag{9}$$

to uwzględniając wzory (8) i (9) można wyznaczyć pewną funkcję $\Omega_1(l_1)$ – łącznych jednostkowych kosztów na odnowienie potencjału eksploatacyjnego N elementów w strukturze cyklu napraw:

$$\Omega_1(l_1) = q_1(l_1) + u_2(l_2) \tag{10}$$

Wartość funkcji $\Omega_1(l_1)$ jest wartością funkcji celu z dla jednego z możliwych przebiegów $l_2 \in \Lambda_2$. Liczba możliwych przebiegów do naprawy l_2 wynosi $\mathrm{mod}(L_2 / l_1)$. Aby wyznaczyć minimalną wartość łącznych jednostkowych kosztów odnowy potencjału eksploatacyjnego N elementów pojazdu przy określonym przebiegu do naprawy elementu o najmniejszym resursie należy wybrać najmniejszą wartość funkcji $\Omega_1(l_1)$, tzn.

$$\Omega_1^*(l_1) = \min_{l_2 \in \Lambda_2} \Omega_1(l_1) = q_1(l_1) + \min_{l_2 \in \Lambda_2} u_2(l_2). \tag{11}$$

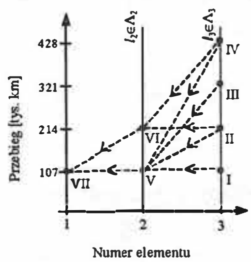
Kolejny krok optymalizacji polega na wyznaczeniu minimum z wartości funkcji $\Omega_1^*(l_1)$ dla wszystkich wartości $l_1 \in \langle 0, L_1 \rangle$ tzn.

$$z^* = \min_{l_1 \in \Lambda_1} \Omega_1^*(l_1). \tag{12}$$

Wartość przebiegu między naprawami, dla którego koszt odnowy potencjału eksploatacyjnego rozpatrywanych elementów okazał się najmniejszy, jest optymalnym okresem między naprawami. Ponieważ przebieg do naprawy pierwszego elementu l_1 jest równy wyznaczonemu okresowi między naprawami, korzystając z zasady krotności, otrzymuje się optymalne wartości przebiegów do naprawy pozostałych elementów l_i^* $(i = 2,3,\ldots N)$.

Wyznaczanie struktury cyklu naprawczego gwarantującego najniższy koszt, zakładając wstępnie wartość l_1, rozpoczyna się od elementu ostatniego tzn. elementu o największym resursie. Problem ten zilustrowano rysunkiem 1 dla liczby elementów N=3.

Jeżeli obiekt składa się tylko z dwóch elementów to $u_2(l_2) = q_2(l_2)$. W tym przypadku wyznaczenie optymalnego okresu między naprawami sprowadza się do znalezienia minimum funkcji celu jednej zmiennej l_1.



I. $u_3(l_3 = 107) = q_3(l_3)$

II. $u_3(l_3 = 214) = q_3(l_3)$

III. $u_3(l_3 = 321) = q_3(l_3)$

IV. $u_3(l_3 = 428) = q_3(l_3)$

V. $u_2(l_2 = 214) = q_2(l_2) + \min\limits_{l_3 \in \Lambda_3 = \{214;428\}} u_3(l_3)$

VI. $u_2(l_2 = 107) = q_2(l_2) + \min\limits_{l_3 \in \Lambda_3 = \{107;214;321;428\}} u_3(l_3)$

VII. $u_1(l_1 = 107) = q_1(l_1) + \min\limits_{l_2 \in \Lambda_2 = \{107;214\}} u_2(l_2)$

Rys. 1. Schemat ustalania optymalnej struktury cyklu napraw dla trzech przykładowych elementów obiektu technicznego z uwzględnieniem zasady krotności przebiegów do naprawy i założonym okresie między naprawami 107 tys. km

Jeżeli w obiekcie wyróżnia się więcej elementów niż dwa, to wartość funkcji $u_2(l_2)$ zależy od wartości funkcji $u_3(l_3)$ tj. kosztów odnowienia potencjału eksploatacyjnego N-2 elementów obiektu, tj. elementów: 3,4,...,N. Zatem

$$u_2(l_2) = \min_{l_2 \in \Lambda_2}[q_2(l_2) + u_3(l_3)],$$

$$u_3(l_3) = \min_{l_3 \in \Lambda_3}[q_3(l_3) + u_4(l_4)],$$

...

$$u_i(l_i) = \min_{l_i \in \Lambda_i}[q_i(l_i) + u_{i+1}(l_{i+1})], \qquad (13)$$

...

$$u_{N-1}(l_{N-1}) = \min_{l_{N-1} \in \Lambda_{N-1}}[q_{N-1}(l_{N-1}) + u_N(l_N)],$$

$$u_N(l_N) = q_N(l_N)$$

gdzie $u_N(l_N) = q_N(l_N)$ oznacza jednostkowe koszty odnowy potencjału eksploatacyjnego N-tego elementu obiektu.

3. Przykład wyznaczania struktury cyklu napraw elementów pojazdów szynowych

Przykład wyznaczania optymalnej struktury cyklu napraw pokazano dla wyróżnionych sześciu elementów pojazdu szynowego. Dane dotyczące liczby jp, po której należy przeprowadzić naprawy elementów i przykładowe koszty napraw przedstawiono w tabeli 1.

Algorytm metody odwzorowano w aplikacji komputerowej SCOOT.xls. Jest to arkusz kalkulacyjny w formacie programu Excel z procedurami napisanymi w języku Visual Basic.

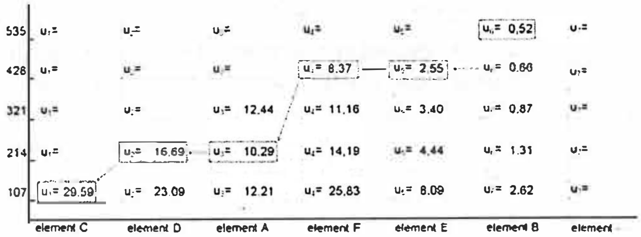
Przykładowe wartości liczby jednostek pracy, po których należy przeprowadzić naprawę wybranych elementów pojazdu szynowego oraz kosztów napraw tych elementów **Tabela 1**

Nazwa elementu	Identyfikator* i	90%γ-resurs L_i elementu [10^3 km]	Koszt jednej naprawy C_i elementu [zł]
element A	3	380	410,57
element B	6	590	280,63
element C	1	125	1380,19
element D	2	320	1370,47
element E	5	460	810,00
element F	4	430	2490,98

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

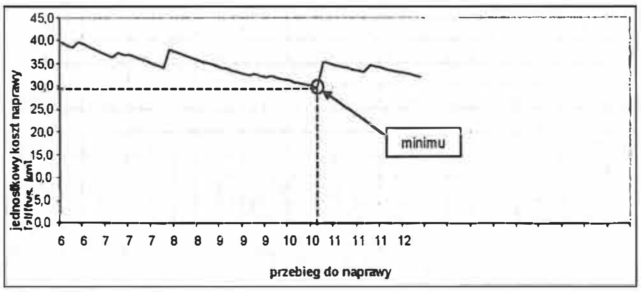
* - *identyfikator elementu wynikający z szeregu pozycyjnego 90% γ-resursów*

Na rysunku 2 pokazano fragment aplikacji z obliczonymi według zależności (13) jednostkowymi kosztami napraw elementów dla przyjętych krotności przebiegu między naprawami. Ramkami oznaczono minimalny łączny jednostkowy koszt napraw elementów, strzałkami ścieżkę wyboru rozwiązania optymalnego.



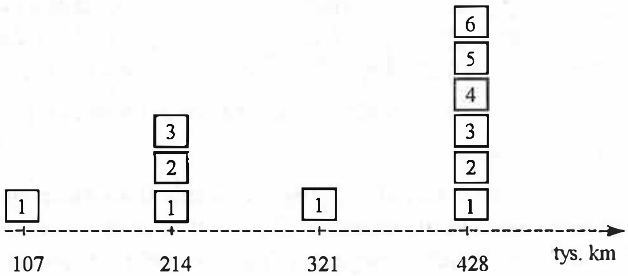
Rys. 2. Jednostkowy koszt napraw elementów pojazdu szynowego w cyklu naprawczym [10^3 km]

Zgodnie z przedstawioną w pracy metodą wyznaczania struktury cyklu napraw elementów pojazdów szynowych, dla przyjętych danych, otrzymano optymalną wartość przebiegu między naprawami wynoszącą 107 tys. km (rys. 3). Jednostkowy łączny koszt naprawy elementów dla tego okresu wyniósł 29,59 zł/tys. km (rys. 3).



Rys. 3. Wartości funkcji celu łącznego jednostkowego kosztu napraw elementów pojazdów szynowych w zależności od długości przebiegu między naprawami wybranych elementów tego pojazdu

Na podstawie uzyskanych danych opracowano strukturę cyklu napraw elementów pojazdu szynowego (rys. 4) zapewniającą minimalny łączny koszt napraw elementów tego pojazdu. Koszt ten wynosi 12 664,52 zł i obejmuje cztery naprawy elementu A, dwie naprawy elementów B i C oraz po jednej naprawie elementów D, E, F w ciągu okresu pracy równego 428 tys. km.



Rys. 4. Schemat optymalnej struktury cyklu napraw elementów pojazdu szynowego dla wartości przebiegu między naprawami 107 tys. km

Istotę działania prezentowanej metody najlepiej oddaje przypadek elementu o identyfikatorze 3 (element A). Jak wynika z przedstawionych danych (rys. 2) łączne koszty naprawy elementów są niższe gdy element A poddany jest naprawie po przebiegu znacznie krótszym niż możliwy dla niego maksymalny przebieg do naprawy ze zbioru $\Lambda_3 = \{107, 214, 321\}$.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania struktury cyklu napraw wybranych elementów pojazdu szynowego. Struktura taka powinna zapewniać odpowiednią niezawodność pojazdu szynowego przy minimalnym łącznym koszcie naprawy jego elementów. Jako kryteria optymalizacji przyjęto jednostkowe koszty napraw oraz określoną trwałość elementów. Ze względu na wybrane charakterystyki do obliczeń wykorzystano koncepcję tzw. techniczno-ekonomiczej metody wyznaczania długości okresu międzynaprawczego. Przyjęcie zasady krotności przebiegów do naprawy, która ułatwia zarządzanie procesem eksploatacji, skłoniło do zastosowania metod programowania dynamicznego w poszukiwaniu rozwiązań optymalnych. Spowodowało to, że efektywność prezentowanej metody zawiera się w zasadzie optymalności.

Badania symulacyjne przeprowadzone z użyciem aplikacji SCOOT.xls wskazały, że długość optymalnego okresu między naprawami dąży do takiej wartości, przy której iloraz kosztu jednej naprawy elementu o największym koszcie naprawy i przebiegu do naprawy tego elementu, jest najmniejszy.

Jeżeli pominąć wymaganie dotyczące krotności przebiegów do naprawy to wartość funkcji celu będzie najmniejsza, gdy przebiegi do naprawy *i*-tych elementów będą równe ich 90% γ-resursom, tj. $l_i = L_i,\ (i = 1,2,\dots,N)$.

Literatura

[1] *Golovatyj A.T., Borcov P.I., Èlektropodvižnoj sostav. Èkspluatacija, nadëžnost' i remont, Moskva, Izd. Transport 1983.*

[2] *Hebda M., Elementy teorii eksploatacji systemów technicznych. Wydawnictwo MCNEMT, Radom, 1990.*

[3] *Jedynak M., Uwagi o optymalizacji cykli naprawczych. Eksploatacja maszyn, nr 10-11, 1985, s. 24.*

[4] *Kadziński A., Koncepcje planowania i optymalizacji eksplo-atacji pojazdów z uwzględnieniem ich niezawodności na przykładzie pojazdów szynowych. Czasopismo Tech-niczne Mechanika. Z.2-M/1991, s. 108-122. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.*

[5] *Koźniewska I., Włodarczyk M., Modele odnowy, niezawodności i masowej obsługi. PWN, Warszawa, 1978.*

[6] *Niziński S., Eksploatacja obiektów technicznych. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, 2002.*

[7] *Ochodek B., Ochodek M., Algorytmy i struktury danych. Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Pile, Piła, 2003.*

[8] *Piasecki S., Optymalizacja systemów obsługi technicznej. WNT, Warszawa, 1972.*

[9] *Szybka J., Zastosowanie modeli decyzyjno-losowych w wyznaczaniu strategii odnów profilaktycznych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, zeszyt 1-2 (93-94), 1993, s. 114÷123.*

[10] *Tomaszewski F., Zagadnienia wyznaczania stanu technicznego złożonego obiektu mechanicznego za pomocą sygnału wibroakustycznego na przykładzie silnika spalinowego pojazdu szynowego. Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998.*