dr hab. inż. Stanisław Młynarski
Politechnika Krakowska
31-864 Kraków, al. Jana Pawła II 37,
tel.: (012) 374 33 22,
email: mlynarski_st@poczta.onet.pl;

dr hab. inż. Robert Pilch
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 10,
email: pilch@agh.edu.pl;

dr inż. Maksymilian Smolnik
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 25,
email: smolnik@agh.edu.pl;

prof. Jan Szybka
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 10,
email: szybja@agh.edu.pl

mgr inż. Grzegorz Wiązania
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 25,
email: wiazania@agh.edu.pl

Model adaptacyjnej strategii prewencyjnej odnowy złożonych obiektów technicznych

Słowa kluczowe: *odnowa profilaktyczna; symulacyjna ocena efektywności; inżynieria niezawodności*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analizy opracowanych modeli do planowania odnowy profilaktycznej złożonych obiektów technicznych, które oparto o dwa różniące się od siebie zestawy założeń. Rozwiązywany problem dotyczy określenia wspólnego czasu odnowy profilaktycznej grupy części lub podzespołów złożonego obiektu. Pierwszy z opracowanych modeli (model planowej strategii odnowy prewencyjnej) pozwala określić zasadność przeprowadzenia ustalonego wcześniej, planowego odnowienia prewencyjnego części obiektu, która została już odnowiona poawaryjnie. Drugi model (model adaptacyjnej strategii odnowy prewencyjnej) umożliwia wyznaczenie najbliższego wspólnego czasu odnowy profilaktycznej grupy części, z których jedna aktualnie podlega odnowie poawaryjnej. Początkowe (wyjściowe) strategie odnowy profilaktycznej każdej części bądź podzespołu wyznaczone zostały za pomocą standardowych narzędzi do planowania odnawiania profilaktycznego (modeli decyzyjno-losowych wykorzystujących programowanie dynamiczne Bellmana). Posługując się opracowanymi modelami odnowy, przeprowadzono przykładowe obliczenia symulacyjne, których

wyniki przedstawiono w postaci całkowitych kosztów obsługiwania dla każdej z uzyskanych strategii. Przedmiotem analizy były wybrane cechy geometryczne koła pojazdu szynowego, których wartości zmieniają się na skutek zużycia w procesie eksploatacji. Na podstawie tego rodzaju analiz można wybrać lepszy (tj. efektywniejszy ekonomicznie) z modeli dla konkretnego zastosowania w praktyce.

Wykaz oznaczeń:
t_i^* – czas odnowy prewencyjnej *i*-tego elementu układu,
k_{ai} – koszt awarii *i*-tego elementu układu,
k_{oi} – koszt odnowy prewencyjnej *i*-tego elementu układu,
t_{max}^* – największa wartość czasu odnowy prewencyjnej jednego spośród wszystkich elementów układu,
t_{min}^* – najmniejsza wartość czasu odnowy prewencyjnej jednego spośród wszystkich elementów układu,
t_{ai} – czas wystąpienia awarii *i*-tego elementu,
t^* – wspólny czas pracy do odnowy prewencyjnej elementów wyznaczony przed awarią *i*-tego elementu,
$F_i(t)$ – wartość dystrybuanty rozkładu czasu pracy do uszkodzenia *i*-tego elementu,
k_{ai} – koszt awarii *i*-tego elementu układu,
k_{oi} – koszt odnowy prewencyjnej *i*-tego elementu układu,
$D(t_{ai})$ – wskaźnik decyzyjny zasadności odnowy,
T_h – skończony horyzont czasowy eksploatacji obiektu,
T_{hmax} – maksymalny czas eksploatacji bez odnowy prewencyjnej lub przeglądu,
Δt – długość przedziału czasu w obliczeniach w modelu decyzyjno-losowym,
n_{OT} – liczba działań obsługowych w rozważanym horyzoncie czasowym,
n – liczba powtórzeń symulacji,
dt – krok czasowy w symulacji,
t_U – wiek układu od początku symulacji,
t_{Ei} – wiek i-tego elementu od początku symulacji,
Pu_{Ei} – prawdopodobieństwo uszkodzenia i-tego elementu w symulacji,
RND_{Ei} – liczba losowa z przedziału [0,1], z rozkładu jednostajnego, dla i-tego elementu,
t_{O_opt} – optymalny okres odnowy układu w symulacji.

1. Wprowadzenie

Zapewnienie efektywnej ekonomicznie i bezpiecznej eksploatacji złożonych obiektów technicznych wymaga stosowania odpowiedniej strategii ich obsługiwania [4]. Jakość procesu eksploatacji, opisywana różnymi wskaźnikami [19], w znacznej mierze zależy od prawidłowej odnowy obiektów technicznych. Zagadnienie to jest szczególnie ważne, gdy dotyczy układów, w których uszkodzenia elementów mogą doprowadzić do wystąpienia zagrożenia zdrowia i życia ludzi lub bardzo dużych strat ekonomicznych. W tego typu przypadkach może być uzasadnione odnawianie prewencyjne elementów układu, a optymalny czas jego przeprowadzania wyznacza się przy wykorzystaniu różnych modeli odnów prewencyjnych [15, 20]. W tym celu wykorzystuje się dane ekonomiczne związane z awariami i odnowami oraz charakterystyki niezawodnościowe elementów układu. Oprócz klasycznych modeli odnawiania, w literaturze dostępnych jest wiele modeli odnowy [10] ukierunkowanych na zapewnienie wymaganego poziomu niezawodności całego układu [12, 21], niektóre z nich opierają się na zastosowaniu metod symulacji [5, 8]. Stosowane są również modele

uwzględniające możliwość wykonania odnowy częściowej (por. [7, 8]), czy też wykorzystujące dane z dodatkowych kontroli stanu technicznego obiektu, jeżeli jest możliwość przeprowadzania ich w trakcie pracy układu [2, 3]. Szczegółową i wyczerpującą klasyfikację istniejących modeli odnawiania prewencyjnego zamieszczono w opracowaniu [20].

Model wykorzystany do wyznaczenia optymalnego czasu odnowy prewencyjnej (t^*) powinien być dostosowany do specyfiki i warunków eksploatacji rozważanego obiektu. Tylko wtedy, stosowanie wyznaczonej z jego użyciem strategii odnów prewencyjnych, będzie uzasadnione ekonomicznie i zapewni zmniejszenie awaryjności obiektu [11, 14].

Celem artykułu jest opracowanie adaptacyjnego modelu odnawiania złożonych obiektów technicznych oraz symulacyjnej metody do oceny efektywności stosowania wyznaczonej tym modelem strategii odnowy.

W artykule rozważano specyficzny problem odnowy obiektu złożonego, którego części funkcjonują w strukturze szeregowej i ich uszkodzenia traktuje się jako niezależne od siebie, jednak ze względów organizacyjnych i ekonomicznych indywidualna odnowa każdej z nich może być mniej opłacalna niż odnawianie blokowe.

W skomplikowanych przypadkach, gdy odnowy pewnych części analizowanych złożonych obiektów technicznych związane są czasowo z działaniami obsługowymi dotyczącymi innych jednostek lub układów tego samego obiektu, po wystąpieniu awarii konieczne jest rozważenie modyfikacji zaplanowanej strategii odnowy uszkodzonej części lub nawet całego obiektu. Problem ten jest przedmiotem rozważań podjętych w niniejszym opracowaniu.

Opracowane rozwiązania stanowią istotne uzupełnienie istniejących modeli odnowy ze względu na potrzeby występujące w praktyce.

W artykule przedstawiono opracowaną oryginalną metodę oceny efektywności stosowania proponowanych strategii przeprowadzoną przy użyciu autorskiego programu komputerowego. Opracowaną metodę zweryfikowano przy wykorzystaniu przykładu praktycznego dotyczącego uszkodzeń kół pojazdu szynowego typu elektryczny zespół trakcyjny.

2. Modele odnawiania prewencyjnego złożonych układów

Obiekty techniczne składają się z wielu elementów konstrukcyjnych, które posiadają indywidualne charakterystyki eksploatacyjne. Empiryczne wskaźniki niezawodności części składowych opisywane są często różnymi modelami i wykazują znacząco różne przebiegi dla każdej z nich [7]. Powoduje to problemy decyzyjne dotyczące wyznaczania terminów i zakresu dokonywanej ze względów bezpieczeństwa odnowy całych obiektów lub ich zespołów i części, a w konsekwencji prowadzenia ich racjonalnie i ekonomicznie uzasadnionej eksploatacji [por. 6, 16].

2.1. Wyznaczanie wspólnego czasu odnowy profilaktycznej elementów układu

W przypadku odnawiania prewencyjnego układów, które składają się z pewnej liczby różniących się od siebie elementów, ze względów organizacyjnych i ekonomicznych najczęściej poszukuje się wspólnego czasu przeprowadzenia odnowy dla wszystkich elementów – tj. dla całego układu [17]. Jeśli w wykorzystywanym modelu odnawiania prewencyjnego pewien zespół złożonego obiektu technicznego rozważany jest jako całość – istnieje określona dla niego funkcja niezawodności i koszty odnowy oraz awarii, to wyznaczony

optymalny czas odnowy odnosi się do całego tego zespołu i jest on odnawiany prewencyjnie i poawaryjnie zawsze jako całość (odnowie podlegają jednocześnie wszystkie jego części).

Problem wyznaczenia wspólnego czasu odnowy pojawia się, gdy dla poszczególnych elementów układu wyznaczone są optymalne (według przyjętego modelu odnawiania prewencyjnego), różniące się od siebie (ale zbliżone) czasy odnawiania prewencyjnego. Proponowany sposób ujednolicenia czasu odnowy prewencyjnej zakłada uwzględnienie indywidualnych czasów odnowy elementów (t_i^*), ich kosztów odnowy prewencyjnej (k_{oi}), kosztów awarii (k_{ai}) oraz przyrostów wartości dystrybuant w zakresie rozstępu indywidualnych czasów odnów prewencyjnych dla wszystkich rozważanych elementów. Przyrost wartości dystrybuanty oraz koszty odnowy i wystąpienia awarii będą dla każdego z elementów stanowić wagę jego indywidualnego czasu odnowy prewencyjnej (t_i^*). Wspólny czas odnowy (t^*) proponuje się wyznaczać wg zależności:

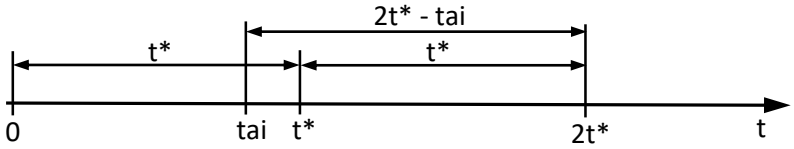
$$t^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i^* \cdot (k_{ai}+k_{oi}) \cdot [F_i(t_{max}^*) - F_i(t_{min}^*)]}{\sum_{i=1}^{n} (k_{ai}+k_{oi}) \cdot [F_i(t_{max}^*) - F_i(t_{min}^*)]}, \quad (1)$$

gdzie:
t_i^* – czas odnowy prewencyjnej *i*-tego elementu układu,
k_{ai} – koszt awarii *i*-tego elementu układu,
k_{oi} – koszt odnowy prewencyjnej *i*-tego elementu układu,
t_{max}^* – największa wartość czasu odnowy prewencyjnej jednego spośród wszystkich elementów układu,
t_{min}^* – najmniejsza wartość czasu odnowy prewencyjnej jednego spośród wszystkich elementów układu.

Wspólny czas odnowy prewencyjnej rozpatrywanego zespołu (t^*) może być również wyznaczany z uwzględnieniem ustalonych cyklicznych przeglądów i działań obsługowych realizowanych dla innych zespołów i części tego samego złożonego obiektu [9]. Takie podejście jest często stosowane w praktyce eksploatacyjnej w dużych przedsiębiorstwach transportowych, gdzie wynikające z zastosowanego modelu odnawiania prewencyjnego optymalne okresy odnowy i przeglądów poszczególnych zespołów są skracane lub wydłużane tak, aby stanowiły całkowitą wielokrotność przeprowadzanych zgodnie z harmonogramem czasowym czynności obsługowych większej liczby zespołów i części tego obiektu. Działanie takie pozwala zmniejszyć liczbę przestojów złożonego obiektu technicznego przynosząc wymierne efekty ekonomiczne.

2.2. Model planowej strategii odnowy prewencyjnej układu

Po wyznaczeniu wspólnego czasu odnowy prewencyjnej dla wszystkich elementów układu (t^*), strategia wspólnej cyklicznej ich odnowy po przepracowaniu tego czasu może być łatwo stosowana do chwili, gdy któryś z elementów ulegnie awarii. Gdy takie zdarzenie wystąpi pojawia się problem decyzyjny, czy odnowiony po awarii element odnowić również w zaplanowanym wspólnym terminie (mimo, że nie osiągnie on jeszcze wtedy czasu pracy t^* do zaplanowanej odnowy), czy pozostawić go do kolejnego wspólnego terminu odnowy (Rys. 1), czyli wydłużyć czas jego pracy do odnowienia prewencyjnego ponosząc zwiększone ryzyko wystąpienia awarii.



Rys. 1. Planowy czas pracy elementu do odnowy prewencyjnej i wydłużony po wystąpieniu uszkodzenia

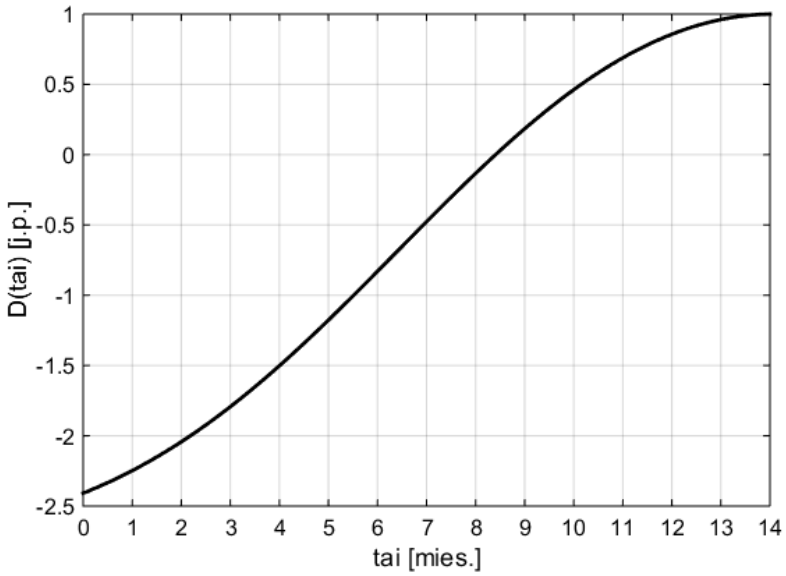
Rozwiązanie problemu wymaga uwzględnienia zwiększonego prawdopodobieństwa uszkodzenia się tego elementu w wydłużonym okresie eksploatacji ($2t^* - t_{ai}$) jak i kosztów związanych z jego ewentualnym dodatkowym odnowieniem (k_{oi}), gdy odnowa elementu zostałaby przeprowadzona w ramach odnowy całego układu mimo, że element ten nie osiągnie jeszcze planowego czasu pracy t^* do swojej odnowy prewencyjnej (przepracuje tylko czas $t^* - t_{ai}$). Wskaźnik na podstawie którego można w takiej sytuacji podejmować decyzję, w stosunku do uszkodzonego elementu, proponuje się wyznaczać z zależności:

$$D(t_{ai}) = k_{oi} + F_i(t^* - t_{ai}) \cdot k_{ai} - \frac{F_i(2 \cdot t^* - t_{ai}) - F_i(t^*)}{1 - F_i(t^*)} \cdot k_{ai}, \qquad (2)$$

gdzie:
t_{ai} – czas wystąpienia awarii *i*-tego elementu,
t^* – wspólny czas pracy do odnowy prewencyjnej elementów wyznaczony przed awarią *i*-tego elementu,
$F_i(t)$ – wartość dystrybuanty rozkładu czasu pracy do uszkodzenia *i*-tego elementu,
k_{ai} – koszt awarii *i*-tego elementu układu,
k_{oi} – koszt odnowy prewencyjnej *i*-tego elementu układu.

Jeśli wartość $D(t_{ai}) \leq 0$, to uzasadniona jest odnowa elementu wraz z pozostałymi mimo, że od odnowy poawaryjnej w chwili t_{ai} nie przepracował on jeszcze czasu równego t^*. Gdy $D(t_{ai}) > 0$, to uzasadnione jest wydłużenie czasu pracy elementu i nie odnawianie go przy najbliższej odnowie pozostałych elementów, lecz dokonanie tego dopiero w trakcie kolejnej odnowy układu, po najbliższej wspólnej odnowie jego elementów.

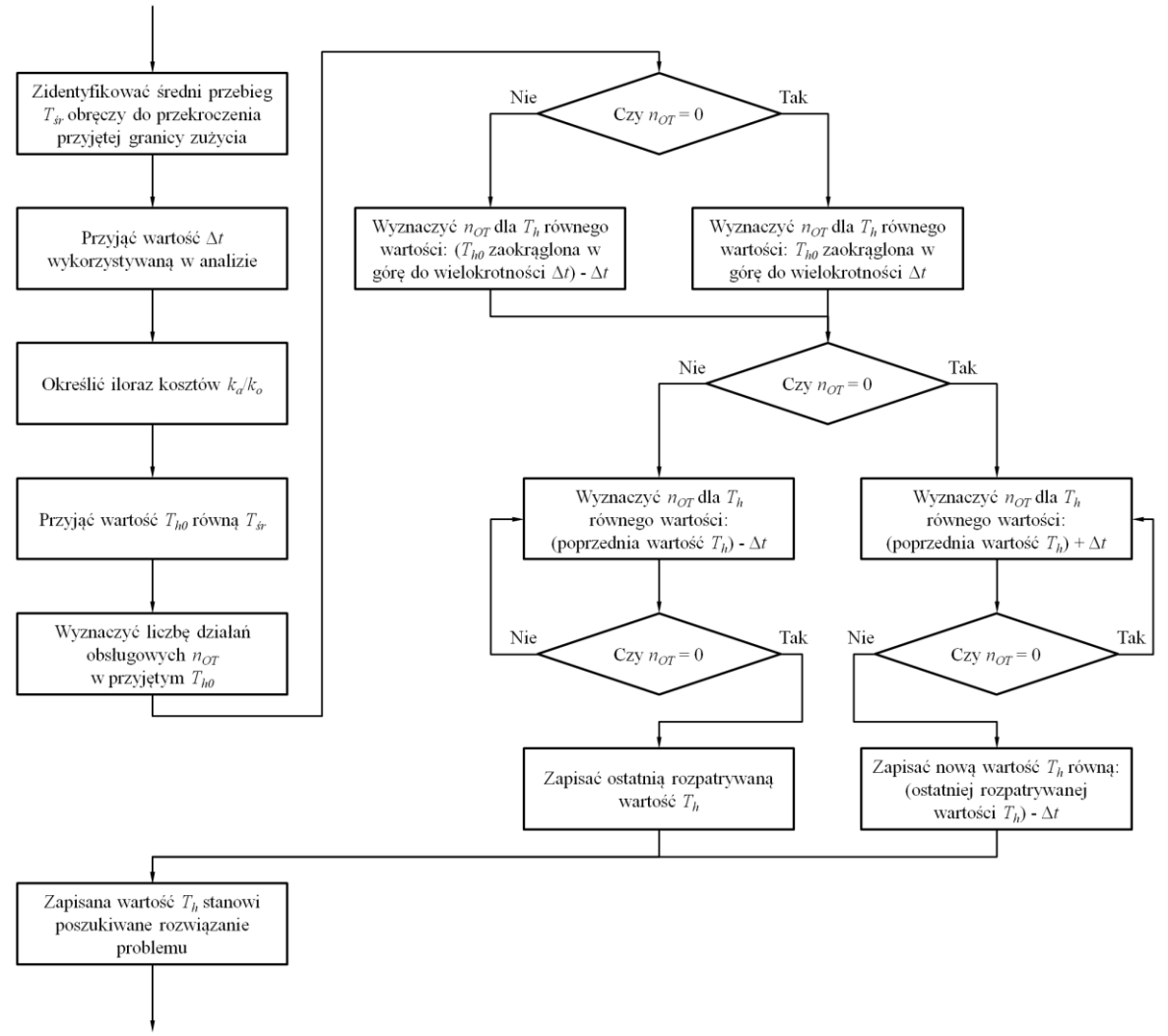
Przy znanych wartościach kosztów awarii i odnowy oraz dystrybuanty czasów pracy do uszkodzenia poszczególnych elementów, dla każdego z nich można wyznaczyć graniczną wartość czasu $t_{ai} = t_{i_gr}$. Jest to wartość czasu, dla którego $D(t_{ai}) = 0$. Jeśli awaria wystąpi przed osiągnięciem przez element tej wartości czasu pracy, to uzasadniona jest jego dodatkowa odnowa wraz z pozostałymi elementami w najbliższym wspólnym terminie odnowy prewencyjnej. Jeśli awaria elementu wystąpi już po osiągnięciu tego czasu pracy, uzasadnione jest wydłużenie czasu pracy elementu bez odnowy. Przykład przebiegu funkcji $D(t_{ai})$ przedstawiono na rysunku 2. Krzywą wykreślono zgodnie z równaniem (2) dla elementu o normalnym rozkładzie czasu pracy do uszkodzenia N(m = 21,5 [mies.]; σ = 4,75 [mies.]), przy ilorazie kosztu awarii i kosztu odnowy ka/ko = 4 i wyznaczonym okresie odnowy prewencyjnej t^* =14 [mies.].



Rys. 2. Przykład przebiegu funkcji $D(t_{ai})$

Z wykresu można odczytać wyznaczoną w tym przypadku wartość t_{i_gr} wynoszącą 8,5 [mies.]. Oznacza to, że jeśli uszkodzenie elementu wystąpi do 8,5 miesiąca eksploatacji, uzasadniona jest jego dodatkowa odnowa prewencyjna z innymi elementami zaplanowana w 14 miesiącu. Jeśli awaria wystąpi już po 8,5 miesiąca, okres jego eksploatacji można wydłużyć (o maksymalnie 5,5 miesiąca) i odnowić ten element nie przy najbliższej wspólnej odnowie elementów układu, ale dopiero w ramach kolejnej.

Innym przedstawionym w literaturze [13] sposobem wyznaczenia wartości czasu t_{i_gr} jest wykorzystanie modeli decyzyjno-losowych opartych na programowaniu dynamicznym i zasadzie optymalności Bellmana. Modele te umożliwiają obliczenie optymalnego okresu odnowy prewencyjnej (t^*) w skończonym horyzoncie czasowym (T_h) eksploatacji obiektu technicznego, ale przy ich zastosowaniu możliwe jest również obliczenie największej wartości T_h, dla której model ten wskazuje na brak opłacalności przeprowadzania odnowy prewencyjnej lub kontroli stanu technicznego układu [13], co pokazano z pomocą schematu na rysunku 3 [18]. Wartość tego maksymalnego czasu (T_{hmax}, bez odnowy prewencyjnej lub przeglądu) jest odpowiednikiem czasu $2t^* - t_{i_gr}$ w modelu proponowanym w niniejszym opracowaniu. Znając T_{hmax} z modelu decyzyjno-losowego można również obliczyć $t_{i_gr} = 2t^* - T_{hmax}$.



Rys. 3. Metoda wyznaczania największego przebiegu obręczy zestawu kołowego, dla którego rozpatrywane działania obsługowe pozostają nieopłacalne [18]

Cechą charakterystyczną przedstawionej planowej strategii odnowy jest fakt, że nie zmieniają się ustalone początkowo wspólne chwile odnowy prewencyjnej wszystkich elementów, wykonywanej w stałych odstępach czasu o wartości t^*. Stosowanie takiej strategii może mieć szczególne uzasadnienie, gdy odnowy rozważanego układu przeprowadzane są w stałych odstępach czasu t^* i w jego wielokrotnościach, związanych z innymi zaplanowanymi działaniami obsługowymi, całego obiektu lub pewnej ich zbiorowości.

2.3. Model adaptacyjnej strategii odnowy prewencyjnej układu

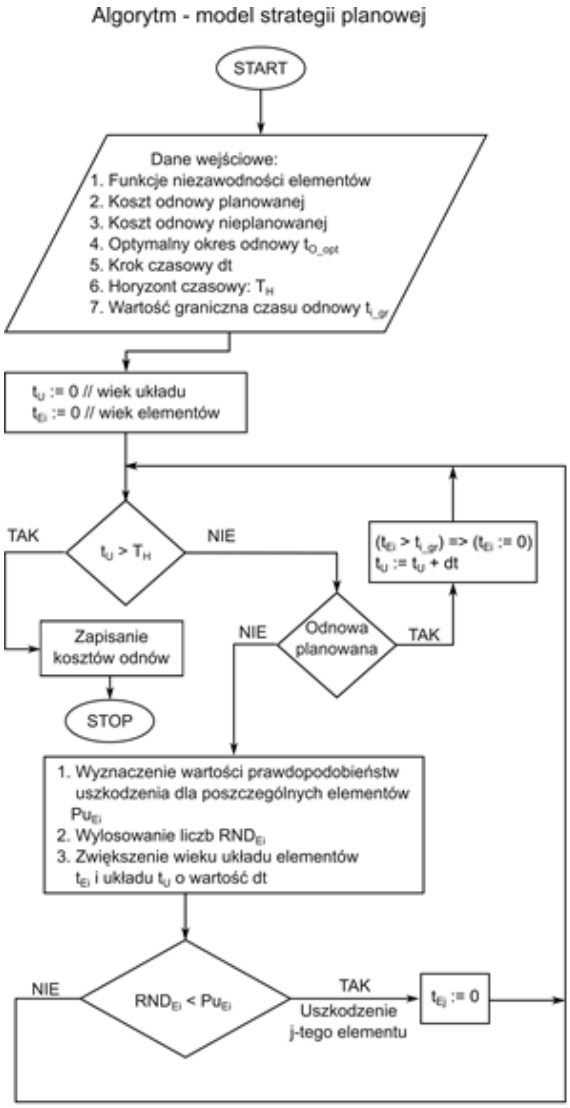
Drugą proponowaną możliwością odnawiania jest stosowanie strategii adaptacyjnej, w której możliwe jest modyfikowanie odstępu między chwilami wykonywania kolejnych odnów prewencyjnych całego układu. Odstęp ten wyznaczany jest na nowo po każdym wystąpieniu awarii dowolnego elementu układu. W modelu tym sytuacja wyjściowa jest taka sama jak w modelu planowej strategii, czyli istnieje wyznaczony stały i wspólny dla wszystkich elementów układu czas pracy do odnowy prewencyjnej (t^*). Strategia zgodna z tym czasem jest stosowana do chwili, gdy któryś z elementów uszkodzi się przed osiągnięciem wieku t^*. Gdy zdarzenie takie wystąpi, w strategii adaptacyjnej, następuje odnowa poawaryjna uszkodzonego elementu

i przy wykorzystaniu wiedzy, że pozostałe elementy nie uległy do tej chwili uszkodzeniu (modyfikacja rozkładów prawdopodobieństwa czasów pracy do uszkodzenia), następuje wyznaczenie kolejnego, wspólnego dla wszystkich elementów, czasu wykonania odnowy prewencyjnej.

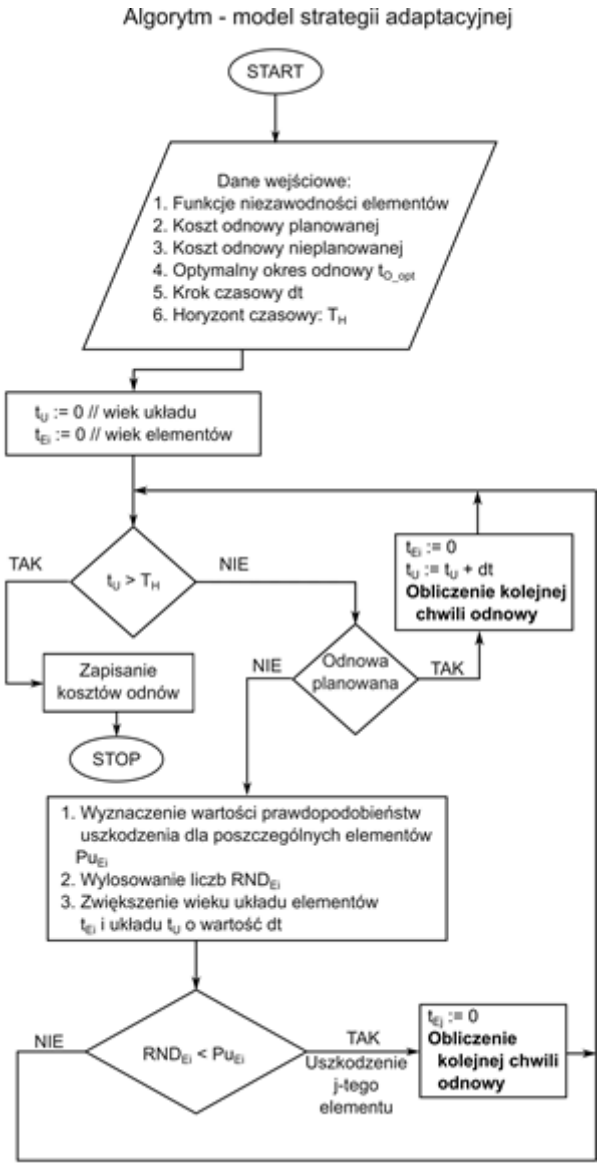
Zaproponowane dwie strategie odnawiania różnią się od siebie, a o tym, która w danym przypadku praktycznym będzie bardziej efektywna, można stwierdzić poprzez wyznaczenie wartości wskaźników ekonomicznych, wynikających z ich stosowania w założonym horyzoncie czasowym [1].

3. Model symulacyjny planowej i adaptacyjnej strategii odnawiania

Symulacyjny model obliczeniowy opracowano na podstawie założeń sformułowanych dla modelu strategii planowej i modelu strategii adaptacyjnej scharakteryzowanych w rozdziale 2. Opracowane algorytmy obliczeniowe pozwalają na wykonanie symulacji komputerowych pracy układu przy stosowaniu każdej z nich. Uproszczone algorytmy przedstawiające pojedynczą iterację symulacji pokazano na rysunkach 4a i 4b.



Rys. 4a. Uproszczony algorytm pojedynczej iteracji symulacji pracy układu według modelu strategii planowej



Rys. 4b. Uproszczony algorytmy pojedynczej iteracji symulacji pracy układu według modelu strategii adaptacyjnej

Szczegółową charakterystykę metody symulacyjnej wykorzystanej do obliczeń można znaleźć w [7], gdzie pokazano możliwość oszacowania niezawodności złożonego obiektu technicznego podlegającego dekompozycji. Na potrzeby niniejszego artykułu metoda ta stanowi bazę, która została w istotnym stopniu uzupełniona o nowe funkcje związane z odnowami prewencyjnymi badanych obiektów. Dzięki temu, poza szacowaniem niezawodności obiektu, możliwa jest również ocena efektywności ekonomicznej różnych strategii odnawiania prewencyjnego jego części.

Dla algorytmu bazującego na modelu strategii planowej przyjęto założenia:

- w przypadku uszkodzenia elementu następuje jego odnowa bez odnowy elementów nieuszkodzonych,
- element ten zostanie odnowiony w ramach odnowy profilaktycznej dla czasu t^*, jeżeli przepracował czas mniejszy niż t_{i_gr}.

Danymi wejściowymi do programu opracowanego na bazie tego algorytmu są: funkcje niezawodności elementów, koszt odnowy prewencyjnej dla każdego elementu k_{oi}, koszt odnowy poawaryjnej k_{ai}, optymalny okres odnowy elementów układu t^*, wartość graniczna czasu t_{i_gr}, krok czasowy dt oraz horyzont czasowy T_H symulacji i liczba symulacji n.

Dla algorytmu bazującego na modelu strategii adaptacyjnej przyjęto założenia:

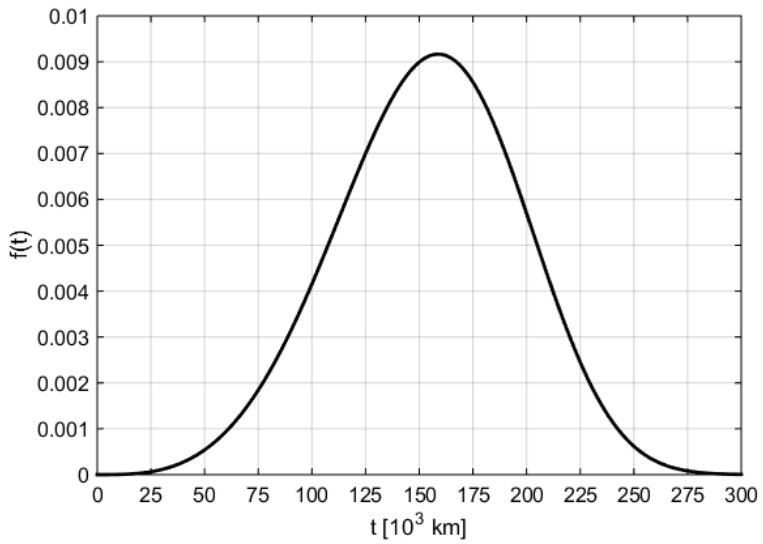
- w przypadku uszkodzenia elementu, następuje jego odnowa, bez odnowy elementów nieuszkodzonych oraz obliczenie chwili najbliższej wymaganej odnowy profilaktycznej wszystkich elementów,
- wykonywanie odnowy prewencyjnej wszystkich elementów w chwili wyznaczanej każdorazowo po awarii dowolnego elementu (jak wyżej).

W tym przypadku jedyną różnicą w odniesieniu do danych wejściowych jest brak konieczności określenia wartości granicznej czasu t_{i_gr}.

4. Wyniki obliczeń

Obliczenia wykonano na podstawie danych inspirowanych doświadczeniami z praktyki eksploatacyjnej monoblokowych zestawów kołowych elektrycznych zespołów trakcyjnych (EZT) składających się z kilku wagonów. Przyjęto, że rozkład ich czasu pracy do uszkodzenia jest zgodny z rozkładem Weibulla o parametrze kształtu υ = 4,1 i parametrze skali β = 170000 [km]. Funkcję gęstości prawdopodobieństwa przebiegu do uszkodzenia dla tego rozkładu zapisano zależnością (3) i przedstawiono na rysunku 5.

$$\mathrm{f}(t) = \upsilon \left(\frac{1}{\beta}\right)^{\upsilon} t^{\upsilon-1} exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\upsilon}\right) \tag{3}$$



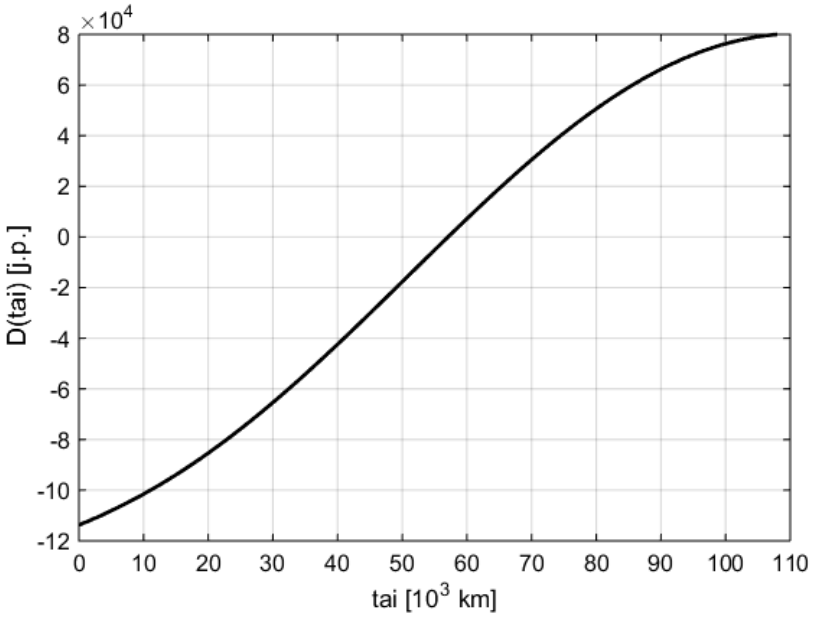
Rys. 5. Przyjęta funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu pracy do uszkodzenia analizowanych zestawów kołowych

Rozważane są tylko uszkodzenia wynikające ze zużycia kół pojazdów w czasie eksploatacji, polegające na przekroczeniu granicznych wartości wymiarów profilu koła określonych w dokumentacji systemu utrzymania pojazdu (DSU). Realizowany u przewoźnika proces eksploatacji zestawów kołowych obejmuje przeglądy i odnowy wykonywane zgodnie z

DSU. Przeglądy przeprowadzane są w z góry ustalonych chwilach – po określonym przebiegu i czasie.

Uwzględniając koszty: odnowy prewencyjnej – na poziomie k_o = 80000 [j.p. – jednostek pieniężnych] i odnowy poawaryjnej – na poziomie k_a = 250000 [j.p.], wyznaczono optymalny okres odnowy prewencyjnej analizowanych zestawów kołowych. Wykorzystano w tym celu modele decyzyjno-losowe [13, 18] i uzyskano wartość czasu odnowy (wyrażoną w kilometrach przebiegu) t^* = 108000 [km].

Wykorzystując te dane wykreślono następnie krzywą obrazującą przebieg funkcji $D(tai)$ według równania (2), przedstawioną na rysunku 6.



Rys. 6. Przebieg funkcji $D(tai)$ dla analizowanego zestawu kołowego

Wynika z niej, że graniczna wartość przebiegu t_{i_gr} dla zestawu kołowego jest równa 58000 [km]. Jeśli koło ulegnie uszkodzeniu przed osiągnięciem tego przebiegu, miałoby być odnawiane po uszkodzeniu razem z pozostałymi kołami wagonu zespołu trakcyjnego i ponownie wraz ze wszystkimi kołami całego zespołu – również przy najbliższej wspólnej odnowie. Jeśli uszkodzi się po tym czasie jest odnawiane po uszkodzeniu, ale przy najbliższej wspólnej odnowie kół całego zespołu już nie – jego czas pracy jest wydłużony do kolejnej odnowy po najbliższej wspólnej odnowie.

Wykorzystując opracowane modele symulacyjne przeprowadzono obliczenia przyjmując do wykonania symulacji dodatkowo następujące wartości parametrów: T_H = 1000000 [km], dt = 5 [km], liczba powtórzeń symulacji n = 10000.

Wybrane wyniki uzyskane po przeprowadzeniu symulacji zestawiono w tabeli 1. Za najistotniejszy wynik symulacji uznano koszty odnowy. Znajduje to uzasadnienie w praktyce eksploatacyjnej, w której często aspekt ekonomiczny eksploatacji stanowi podstawę do oceny wykorzystywanego układu i przyjętej strategii odnowy [5]. Uzyskiwane wyniki stanowią więc istotne przesłanki do podejmowania decyzji w trakcie kierowania procesem eksploatacji.

W tabeli 1 przedstawiono średnie koszty odnów prewencyjnych, poawaryjnych i ich wartość sumaryczną – uzyskane przy stosowaniu obydwu strategii odnawiania rozważanych zestawów kołowych w przyjętym horyzoncie czasowym symulacji.

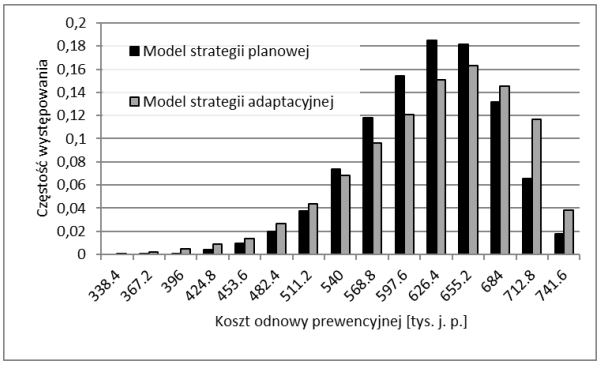
Tab. 1. Wyniki symulacji

Rodzaj wartości kosztów odnowy	Model strategii planowej	Model strategii adaptacyjnej
Średni koszt odnów prewencyjnych [j.p.]	614480	618962
Średni koszt odnów poawaryjnych [j.p.]	1093025	1069500
Średni koszt całkowity odnów [j.p.]	1707505	1688462

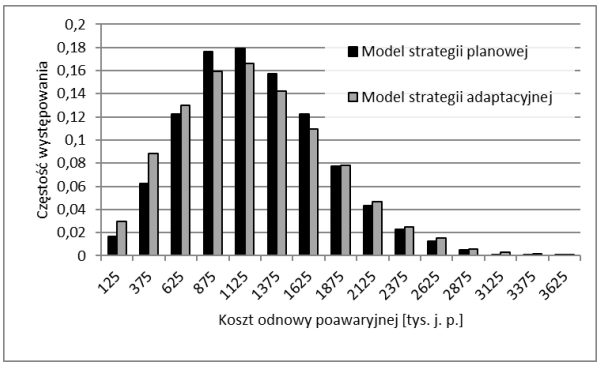
Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że w rozpatrywanym przypadku mniejsze koszty łączne otrzymano przy stosowaniu strategii adaptacyjnej odnawiania, co sugeruje, iż jej stosowanie może być bardziej efektywne ekonomicznie w przypadku rzeczywistej eksploatacji modelowanego obiektu technicznego.

Istotną zaletą wykorzystania symulacji komputerowej do analizy pracy układu według przedstawianych modeli jest możliwość uzyskania rozkładów kosztów odnowy, które zestawiono na rysunku 7.

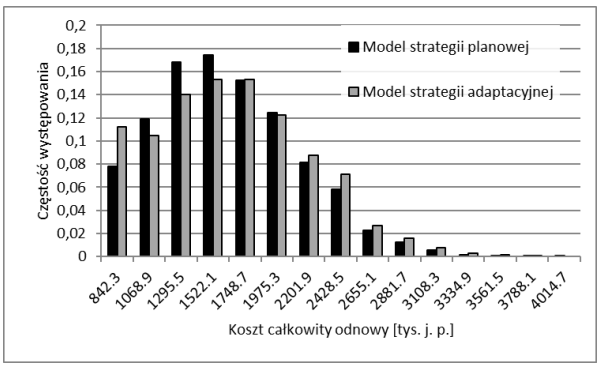
a)



b)



c)



Rys. 7. Rozkłady kosztów odnów prewencyjnych, poawaryjnych i całkowitych dla analizowanych strategii

Prowadzona symulacja daje zatem możliwość oceny prawdopodobieństwa, z jakim koszt odnowy układu nie przekroczy założonego poziomu.

5. Podsumowanie

Ekonomiczne wskaźniki procesu eksploatacji są jednymi z najważniejszych wskaźników wykorzystania pojazdów w systemach transportowych, bowiem to od ekonomiki eksploatacji w dużej mierze zależy poprawne funkcjonowanie całego przedsiębiorstwa. Zaproponowane w pracy metody w znaczący sposób mogą wpłynąć na racjonalne organizowane przeglądów i odnowy profilaktycznej. Wybór strategii obsługiwania powinien zatem uwzględniać kryterium efektywności ekonomicznej. Pomimo, że dla analizowanych strategiach występujące różnice ich stosowania nie są duże, to w praktyce prowadzą one do poważnych konsekwencji ekonomicznych ze względu na znaczące koszty działań obsługowych.

Opracowane i przedstawione w niniejszej pracy metody planowania odnowy prewencyjnej w systemach eksploatacji pojazdów stanowią przydatne narzędzie wspomagania decyzji i prowadzenia racjonalnej eksploatacji obiektów technicznych. Każdy z przedstawionych modeli jest przydatny do zastosowania w różnych warunkach eksploatacji oraz dla złożonych i zróżnicowanych konstrukcyjnie obiektów technicznych.

Przedstawiony w artykule adaptacyjny model wyznaczania strategii odnów prewencyjnych stanowi przyczynek do rozwoju metod przeprowadzania remontów i napraw złożonych obiektów technicznych.

Finansowanie badań

Praca została sfinansowana przez Akademię Górniczo-Hutniczą, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, program badawczy nr 16.16.130.942.

Literatura

1. Andrzejczak K, Młyńczak M, Selech J. Assessment model of operational effectiveness related to newly operated public means of transport. Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference ESREL 2017: 3455–3461.
2. Badia F G, Berrade M D, Campos C A. Optimal inspection and preventive maintenance of units with revealed and unrevealed failures. Reliability Engineering and System Safety 2002; 78: 157–163.
3. Berrade M D, Scarf P A, Cavalcante C A V, Dwight R A. Imperfect inspection and replacement of a system with a defective state: A cost and reliability analysis. Reliability Engineering and System Safety 2013; 120: 80–87.
4. Bradley E. Reliability engineering a Life Cycle Approach. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.
5. Faulin J, Juan Perez A A, Martorell Alsina S S, Ramirez-Marquez J E (Eds.). Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems. London, New York: Springer, 2010.

6. Macchi M, Garetti M, Centrone D, et al. Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis. Reliability Engineering & System Safety 2012; 104: 71–83.
7. Młynarski S, Pilch R, Smolnik M, Szybka J, Wiązania G. A concept of reliability assessment simulation model using systems structural decomposition. Journal of KONBiN 2018; 46: 51–74.
8. Młynarski S, Pilch R, Smolnik M, Szybka J, Wiązania G. Formation of koon Systems Reliability Estimated with Analytical and Simulation Calculation Methods. Journal of KONBiN 2017; 42: 255–272.
9. Młyńczak M. Failure models of mechanical objects. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 2010; 45: 29–43.
10. Nachlas J A. Reliability engineering. Probabilistic models and maintenance methods. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.
11. O'Connor P. Practical reliability engineering. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2012.
12. Peng W, Huang H Z, Zhang X, Liu Y, Li Y. Reliability based optimal preventive maintenance policy of series-parallel systems. Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2009; 2: 4–7.
13. Pilch R. Determination of preventive maintenance time for milling assemblies used in coal mills. Journal of Machine Construction and Maintenance – Problemy Eksploatacji 2017; 1: 81–86.
14. Saranga H, Kumar U D. Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms level of repair analysis. Annals of Operations Research 2006; 143: 91–106.
15. Serkan E, Yilser D. Reliability and optimal replacement policy for a k-out-of-n system subject to shocks. Reliability Engineering & System Safety 2019; 188: 393–397.
16. Song H, Schnieder E. Modeling of railway system maintenance and availability by means of colored Petri nets. Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2018; 2: 236–243.
17. Sowa A. Formal models of generating checkup sets for the technical condition evaluation of compound objects. Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2014; 16(1): 150–157.
18. Smolnik M. Projektowanie procesu obsługiwania obiektów technicznych na przykładzie wybranych wagonów tramwajowych [PhD thesis]. Kraków: AGH w Krakowie, 2018.
19. Świderski A, Jóźwiak A, Jachimowski R. Operational quality measures of vehicles applied for the transport services evaluation using artificial neural networks. Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2018; 2: 292–299.
20. Werbińska-Wojciechowska S. Preventive Maintenance Models for Technical Systems. In: Technical System Maintenance. Springer Series in Reliability Engineering. Springer, Cham, 2019.
21. Zhao Y X. On preventive maintenance policy of a critical reliability level for system subject to degradation. Reliability Engineering and System Safety 2003; 79: 301–308.