

Tomasz Goliasz, Józef Pszczółkowski

# Istota strategii eksploatacji wg kryteriów niezawodności

JEL: R41 DOI: 10.24136/atest.2019.144

Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

W artykule scharakteryzowano strategię eksploatacji urządzeń technicznych. Przedstawiono ich ewolucję z uwzględnieniem zmian filozofii i kryteriów eksploatacji. Dokonano analizy strategii eksploatacji według kryteriów niezawodności, możliwości jej stosowania w aspekcie wspierania procesu decyzyjnego eksploatacji sprzętu. Omówiono strategię eksploatacji RCM (Reliability Centered Maintenance), która może być i jest coraz częściej stosowana w procesach utrzymania maszyn oraz w aspekcie realizacji m.in. procesów produkcyjnych w przedsiębiorstwie. Dokonano oceny możliwości stosowania strategii w wojskowym systemie eksploatacji.

**Słowa kluczowe:** eksploatacja, strategia eksploatacji, niezawodność, RCM (Reliability Centered Maintenance).

## Wstęp

Z uwagi na stopień złożoności współczesnych obiektów technicznych, zarządzanie eksploatacją sprzętu, w tym wydolnością i przepustowością bazy obsługowo-naprawczej dedykowanej do określonej floty sprzętu, jest zadaniem skomplikowanym i wymagającym racjonalności w podejmowaniu decyzji. Dotyczy to również, a może w szczególności, obiektów technicznych używanych przez wojsko. Szczególnie w sytuacji niepewności i niestabilności politycznej oraz ekonomicznej w świecie, kiedy może wystąpić pilna potrzeba użycia wojsk. W związku z powyższym eksploatacja sprzętu powinna być tak ukierunkowana, aby był on utrzymany w pełnej sprawności technicznej w możliwie najdłuższym czasie. Wyłączenie jednostki sprzętowej z użytkowania generuje straty dla przedsiębiorstwa, czy obniżenie gotowości bojowej w odniesieniu do jednostki wojskowej. Wynika stąd wniosek, że czas wyłączenia sprzętu z użytkowania związany z koniecznością przeprowadzenia czynności obsługowych powinien być minimalizowany.

Powyższe nasuwa wniosek, że eksploatacja obiektów technicznych, od których użytkownik oczekuje niemalże permanentnej gotowości do użycia, wymaga stosowania w zarządzaniu procesami eksploatacji zaawansowanych narzędzi oraz metod planowania użytkowania i obsługi. Powinny one umożliwić najefektywniejsze wykorzystanie stacjonarnej i mobilnej bazy obsługowo-naprawczej. Maksymalizacja efektywności działania wymaga zarządzania w sposób uwzględniający szereg czynników: zapasy magazynowe, dostępność wykwalifikowanego personelu technicznego, dostępność stanowisk obsługowych, obieg dokumentów księgowych, procedury decyzyjne, itp.

Jednym z głównych celów eksploatacji jest utrzymanie wysokiej niezawodności sprzętu poprzez prowadzenie badań niezawodności i wskazywanie sposobów i środków zapewnienia wymaganego poziomu gotowości i niezawodności. Zapewnienie niezawodności urządzeń wiąże się także z właściwym utrzymaniem bazy obsługowo-naprawczej oraz sprawnością i skutecznością jej działania. Realizacja tak postawionych celów eksploatacji wymaga racjonalności i efektywności działań w zakresie użytkowania i utrzymania sprzętu. Zbiór zasad postępowania w zakresie działań eksploatacyjnych można określić jako strategię eksploatacji. Istnieje ścisły związek między poziomem niezawodności sprzętu a racjonalnością

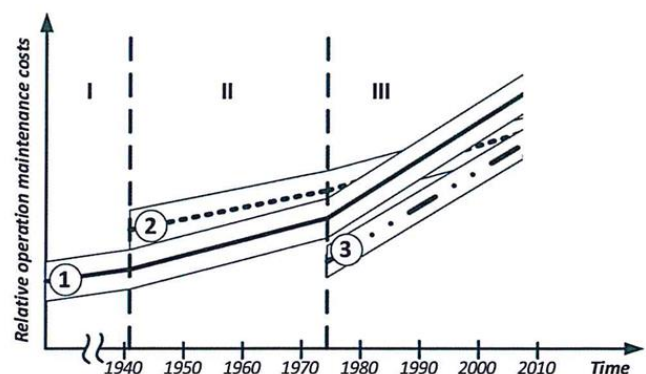
strategii eksploatacji – istnieją bowiem możliwości szerokiego wykorzystania narzędzi niezawodności dla sterowania procesami eksploatacji urządzeń, ich użytkowania i obsługi, zapewnienia potencjału produkcyjnego systemu obsługi i napraw, a także zaopatrzenia w odpowiednie materiały i części zamienne.

Zatem strategia eksploatacji oparte na kryteriach niezawodności urządzeń nie powinna polegać na realizacji działań obsługowych, a zwłaszcza naprawczych w chwili wystąpienia uszkodzenia, lecz wykorzystywać narzędzia i metody niezawodności do prognozowania działań eksploatacyjnych. Celem artykułu jest analiza strategii eksploatacji według kryteriów niezawodności oraz przedstawienie możliwości ich wykorzystania do sterowania eksploatacją sprzętu technicznego, w tym także w systemach eksploatacji sprzętu wojskowego, wymaganych analiz, zasad i sposobu wdrożenia.

## 1. Ewolucja strategii zarządzania eksploatacją

Na przebieg ewolucji strategii zarządzania systemami obsługowo-naprawczymi ma istotny wpływ wzrost znaczenia faktu utrzymania urządzeń w sprawności eksploatacyjnej. Wpływ również mają koszty utrzymania sprawności. Zasadniczo daje się zauważyć trzy okresy w ewolucji zarządzania procesami obsługowo-naprawczymi [1, 2, 3, 4]. Przedstawiono to na poniższym rysunku 1.

1. Okres reaktywnego utrzymania ruchu (reactive maintenance), gdzie naprawy realizowane są po wystąpieniu uszkodzenia.
2. Okres prewencyjnego utrzymania ruchu (preventive maintenance) – naprawy mają charakter planowo-zapobiegawczy.
3. Okres prognostycznego (proaktywnego) utrzymania ruchu (predictive (proactive) maintenance) – dla którego charakterystyczne są: monitorowanie stanu technicznego, inspekcje zapobiegawcze, udział operatorów urządzeń i maszyn w utrzymaniu ruchu, RCM, TPM, 5S, samodzielne przeglądy.



Rys. 1. Trzy okresy rozwoju i odpowiadające im trzy koncepcje utrzymania ruchu maszyn i urządzeń [1]

Okres pierwszy, począwszy od początku stosowania urządzeń do początku II Wojny Światowej, charakteryzował się doraźnym reagowaniem na wystąpienie awarii (reactive maintenance). Z uwagi na niski stopień mechanizacji awarie nie miały istotnego wpływu na przebieg procesów produkcyjnych. Obsługiwanie sprzętu było uważane za działalność pomocniczą, trudną do zaplanowania pod względem czasu wystąpienia oraz wysokości kosztów obsług czy napraw. Mimo wszystko zastanawiano się czy można przeciwdziałać wystąpieniu uszkodzeń i jak powinno się to wykonywać.

Powstała wtedy koncepcja systemu planowo-zapobiegawczego remontów, którego istotą jest podejmowanie czynności obsługowych w ustalonych odstępach czasu lub po wykonaniu określonej ilości pracy (strategia według resursu).

Wtedy zaczęła następować zmiana sposobu myślenia na temat utrzymania maszyn i urządzeń, tj.:

1. Powstała koncepcja zapobiegania uszkodzeniom spowodowana zwiększeniem zależności procesów wytwarzania od stanu urządzeń oraz nastąpiła zmiana poglądów na problem intensywności uszkodzeń.
2. Nastąpiła zmiana znaczenia systemów planowania i sterowania utrzymaniem, spowodowana wzrostem kosztów eksploatacji, w porównaniu do innych kosztów operacyjnych.
3. Wzrosło zainteresowanie zarządów firm wydłużeniem czasu eksploatacji obiektów technicznych, spowodowane wzrostem wartości kapitału zaangażowanego w urządzenia czy maszyny.

Połowa lat siedemdziesiątych dwudziestego wieku to początek trzeciej fazy ewolucji strategii eksploatacji. Kluczowym elementem tej fazy było zapewnienie bezawaryjnej pracy urządzeń i maszyn w całym okresie życia obiektu technicznego. Na taką zmianę spojrzenia miały wpływ następujące czynniki:

1. Szybko postępujące zmiany w przemyśle, polegające na wzroście ilości oraz stopnia złożoności obiektów technicznych oraz automatyzacja i robotyzacja procesów wytwarzania.
2. Nowe spojrzenie na eksploatację w związku z rozwojem narzędzi diagnostyki technicznej. Diagnostyka techniczna zajmuje się oceną stanu technicznego maszyny lub urządzenia technicznego poprzez badanie własności procesów roboczych i towarzyszących pracy maszyny, a także poprzez badanie własności wytworów maszyny. Termin diagnostyka pochodzi z języka greckiego, gdzie *diagnosis* oznacza rozpoznanie, rozróżnianie, osądzenie, a *diagnostike techné* oznacza sztukę rozróżniania, stawiania diagnozy [5].
3. Nowe koncepcje organizacji i zarządzania przedsiębiorstwem, szczególnie w skali globalnej, dążenie do zarządzania zasobami w duchu koncepcji Just In Time (JIT) oraz doskonalenie wyrobów metodą Total Quality Management (TQM).
4. Wzrost kosztów utrzymania ruchu – obecnie jest to jeden z priorytetów w zakresie kontroli kosztów.
5. Permanentne ulepszanie standardów bezpieczeństwa i higieny pracy oraz standardów w zakresie ochrony środowiska.
6. Nowe poglądy w zakresie relacji starzenia się maszyn i urządzeń, a intensywnością uszkodzeń.

Wśród koncepcji, które powstawały w związku z trzecią fazą ewolucji zarządzania systemami eksploatacji największego znaczenia zaczęła nabierać strategia utrzymania sprzętu zorientowana na niezawodność, tzw. RCM (Reliability Centered Maintenance) – strategia skierowana na niezawodność. Równoległe zaczął zmieniać się sposób myślenia o utrzymaniu sprzętu skierowany na produktywność (Total Productive Maintenance – TPM) – całościowe utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją.

## 1.1. Literaturowy podział strategii eksploatacji

Podstawowy, ogólny podział strategii eksploatacji omawianych w literaturze przedmiotu pozwala na wyodrębnienie strategii reaktywnych i prewencyjnych.

**Strategie reaktywne (bierne)** – utrzymanie ruchu zgodnie z tą strategią zakłada możliwość wystąpienia usterki, lecz nie są podejmowane żadne działania, mogące kontrolować i przeciwdziałać jej występowaniu. Działania takie są podejmowane w chwili wystąpienia uszkodzenia, jako reakcja na zaistniałe zdarzenie.

**Strategie prewencyjne (profilaktyczne)** – polegają na zapobieganiu awariom i uszkodzeniom maszyn. U podstaw tych strategii

leży założenie dotyczące cyklu życia urządzenia i możliwego ryzyka uszkodzenia. Profilaktyka obsługowa może przybierać przy tym następujące formy: okresowa (planowa – według upływu określonego czasu), rewersowa (planowa – według wykonania określonej pracy), diagnostyczna (uwarunkowana rzeczywistym stanem maszyny). W literaturze można spotkać następujący szczegółowy podział strategii eksploatacji. Jedną z pozycji literaturowych [6] dzieli je w następujący sposób:

1. Według resursu (potencjału eksploatacyjnego – PE).
2. Według stanu technicznego.
3. Mieszana strategia eksploatacji.
4. Według efektywności ekonomicznej.
5. Według niezawodności.
6. Autoryzowana strategia istnienia maszyn.
7. Holistyczna strategia eksploatacji.
8. Strategia skoncentrowana na niezawodność (RCM), która jest nowoczesną wersją strategii według niezawodności – czy też jej rozwinięciem.

Zasadniczo w oparciu o jedną z podanych strategii jest budowany system zarządzania eksploatacją w przedsiębiorstwie (jednostce wojskowej – JW), przy czym wybierany jest jeden system bazowy, a pozostałe strategie stanowią jego uzupełnienie. Przy wyborze strategii nie bez znaczenia jest specyfika zadań, jakie realizuje dane przedsiębiorstwo oraz kluczowe problemy, które w jego zasadniczej działalności są generowane w związku z procesami obsługowo-produkcyjnymi. Do podstawowych trudności, które generują dalsze problemy w czasie realizacji zadań można zaliczyć:

1. Problem utrzymania właściwego poziomu zapasów.
2. Problem tworzenia się kolejek.
3. Problem dotyczący kolejności realizacji zgłoszeń do systemu obsługowo-naprawczego (SON).
4. Problem wyboru trasy realizacji naprawy, np. warsztat, lakiernia.
5. Problemy decyzji w zakresie regeneracji i wymiany.

Powyższe czynniki mają zasadniczy wpływ na wybór strategii zarządzania, które zostaną omówione poniżej.

Założeniami **Strategii według resursu, potencjału eksploatacyjnego, tj. ilości wykonanej pracy (system planowo-zapobiegawczy)** są:

1. Ustalony zakres czynności przyporządkowanych konkretnej obsłudze.
2. Okresowość realizacji ustalonych usług.
3. Hierarchizacja usług.

Ten typ strategii jest oparty na przyjęciu normatywu, np. przejechanych kilometrów lub przepracowanych godzin, który staje się wyznacznikiem do kierowania sprzętem do określonej naprawy lub obsługi. Doświadczenia pokazały, że jest to metoda mało efektywna pod względem ekonomii.

**Strategia według stanu technicznego** – założeniem tej strategii eksploatacji jest ciągłe monitorowanie stanu technicznego eksploatowanego obiektu poprzez sprawdzanie jego parametrów eksploatacyjnych. Na podstawie informacji diagnostycznej, uzyskanej podczas wykonywanych pomiarów i sprawdzeń, podejmowana jest decyzja dotycząca sposobu postępowania z eksploatowanym obiektem. Wadą tej strategii jest wysoki koszt projektowania i budowy niezawodnych podsystemów diagnostycznych oraz systemów informatycznych.

**Strategia mieszana** umożliwia zarządzanie dużym skomplikowanym systemem obsługowym. Wymagane jest wówczas łączenie, np. dwóch powyższych strategii zarządzania. Łączenie dwóch powyższych systemów określane jest, jako system pośredni (mieszany). Stałe są terminy realizacji zadań obsługowo-naprawczych, a ich zakres zależy od diagnostycznej oceny stanu obiektu.

**Strategia według efektywności ekonomicznej** jest oparta na kryterium minimalizacji kosztów eksploatacji maszyn i urządzeń, a decyzje eksploatacyjne podejmowane są w oparciu o kryteria ekonomiczne. Podstawą do podjęcia decyzji dotyczącej sposobu eksploatacji maszyn jest analiza danych dotyczących niezawodności, kosztów utrzymania i napraw maszyn.

**Strategia według niezawodności**, zwana również strategią według uszkodzeń, zakłada użytkowanie maszyn do chwili wystąpienia uszkodzenia. W ramach tej strategii wykorzystuje się metody statystyczne oraz komputerowe techniki symulacyjne i programowane badania niezawodności. Znalazła ona zastosowanie w obszarach eksploatacji, gdzie następstwa uszkodzenia maszyn nie mają wpływu na bezpieczeństwo użytkownika sprzętu lub nie powstają dodatkowe koszty związane z wykonywaniem napraw.

Ten model zarządzania określany jest strategią do uszkodzenia (wg niezawodności). Według autorów opracowania [7] strategia ta polega na eksploatacji obiektu do chwili wystąpienia uszkodzenia, może być ona stosowana tylko wówczas, gdy następstwa uszkodzeń nie naruszają zasad bezpieczeństwa pracy i nie zwiększają kosztów eksploatacji maszyn.

**Autoryzowana strategia istnienia maszyny (ASIM)** jest bezpośrednio związana z wytwórcą wyrobu, który jest odpowiedzialny za produkt od momentu pojawienia się pomysłu o nim, poprzez fazę projektowania, wytwarzania, eksploatacji, aż do utylizacji lub likwidacji obiektu. W tej strategii producent tworzy własne rozwiązania dotyczące sposobu serwisowania urządzenia. Ponadto wyposaża obiekty we własne środki i systemy diagnostyczne.

**Holistyczne strategie eksploatacji** – według tej strategii eksploatacji wszelkie zjawiska tworzące układ całościowy, podlegają pewnym prawidłowościom, według których nie można wnioskować o właściwościach całego systemu na podstawie wiedzy o prawidłowościach rządzących pojedynczymi podsystemami. Całości systemu nie da się sprowadzić do sumy jego komponentów.

**Strategia RCM – strategia eksploatacji zorientowana na niezawodność** powstała na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX wieku. RCM to strategia określająca niezbędne działania i czynności ukierunkowane na utrzymanie w sprawności eksploatacyjnej obiektów technicznych z uwzględnieniem warunków użytkowania. Uwzględnia się także kwestie warunków pracy, stanu technicznego oraz historię zdarzeń eksploatacyjnych maszyny. Opisywana strategia jest szczególnie istotna dla systemów eksploatacji funkcjonujących w obszarach zagrożenia zdrowia i bezpieczeństwa publicznego.

## 2.Strategia RCM

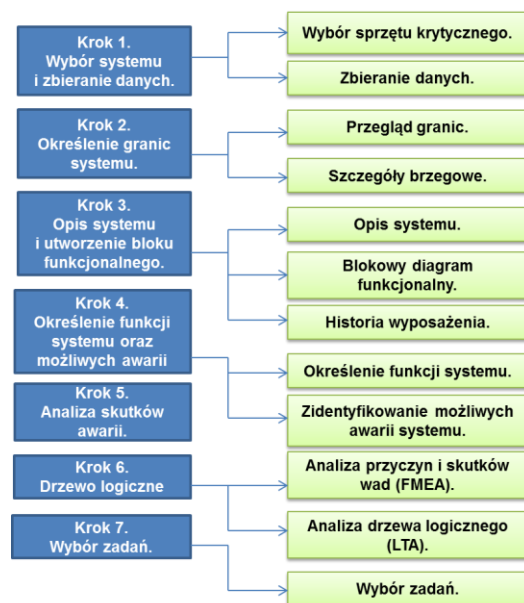
Istotą koncepcji RCM jest siedem podstawowych pytań sformułowanych w 1999 roku przez International Society of Automotive Engineers:

1. Jakie funkcje spełnia urządzenie i jakie ma osiągać standardy (wydajność, jakość produktu, koszty eksploatacji, bezpieczeństwo) w odniesieniu do zadań, jakie są stawiane przed obiektem technicznym?
2. W jaki sposób obiekt może nie zrealizować zadań, do jakich został skonstruowany?
3. Co może być przyczyną wystąpienia uszkodzeń funkcjonalnych?
4. Jakie mogą być konsekwencje wystąpienia awarii?
5. Jakie znaczenie ma każdy ze skutków tych uszkodzeń?
6. Jakie czynności należy wykonać, aby prognozować lub ochronić maszynę przed ewentualnym uszkodzeniem?
7. Co należy zrobić, jeśli nie zdefiniowano działania zapobiegawczego?

Warto wspomnieć, że koncepcja RCM jest uzupełniana przez strategię TPM. Total Productive Management (TPM) jest koncepcją znaną dla trzeciego okresu rozwoju idei utrzymania ruchu. Według S. Nakajimmy utrzymanie ruchu maszyn i urządzeń to zapewnienie im własnej „kondycji zdrowotnej”. Definiuje on TPM, jako działanie realizowane przez każdego pracownika będącego członkiem organizacji w celu zapewnienia wzrostu produktywności urządzeń i maszyn. Dodatkową metodą jest filozofia 5S, nazywana też praktykami 5S, której założeniem jest dbałość o dyscyplinę, porządek i optymalne gospodarowanie. Nazwa 5S pochodzi od japońskich słów: selekcja (pozbaądź się rzeczy niepotrzebnych), sprzątnięcie (posprzątaj miejsce pracy), systematyka (miejsce na wszystko i wszystko na swoim miejscu), schludność (ustalaj standardy), samodyscyplina (utrzymuj standardy). Stosowanie TPM i 5S powoduje wydłużenie przedziałów resursu między obsługami lub naprawami wydłużając trwałość obiektów technicznych.

Filozofia zarządzania systemem utrzymania ruchu czy eksploatacji zorientowane na niezawodność jest przedmiotem ciągłego rozwoju, szczególnie w ostatnich dekadach, m. in. w przemyśle lotniczym, czy elektrowniach atomowych [8].

Głównym celem RCM jest zwiększenie wydajności produkcji przez zwiększenie wydajności sprzętu. Jednym z najważniejszych narzędzi wspomagających proces RCM jest analiza przyczyn i skutków wad – FMEA (ang. Failure Mode and Effects Analysis). Z wykorzystaniem analizy FMEA uzyskuje się odpowiedzi na wszystkie postawione pytania. Podczas wdrażania RCM stosuje się podejście systemowe. Pozwala ono na ochronę funkcji systemu, identyfikację możliwych uszkodzeń, wskazanie uszkodzeń krytycznych oraz zadań dla prewencyjnego utrzymania ruchu. Główne etapy (kroki) RCM zostały przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Główne etapy RCM

W odniesieniu do strategii RCM istotnym aspektem jest wybór systemu, który chcemy objąć wymienioną strategią oraz tworzenie bazy danych dotyczących obszaru zainteresowania. Określenie listy komponentów systemu jest pierwszym etapem RCM. Następnie wykonuje się analizę punktów krytycznych, która wymaga różnych typów danych o komponentach tworzących system. Skutki awarii głównych komponentów systemu mogą przekładać się na produktywność systemu i koszty utrzymania. Czynniki wpływające na wybór punktów krytycznych systemu są następujące:

1. Średni czas między uszkodzeniami (Mean time between failures – MTBF).

2. Całkowite koszty utrzymania (Total maintenance cost - TMC).
3. Średni czas do naprawy (Mean time to repair - MTTR).
4. Dostępność (Availability).

Istotnym elementem w strategii RCM jest określenie procedur w zakresie eksploatacji systemu. Określenie omawianych procedur ułatwia analiza drzewa logicznego (Logic Tree Analysis) i analiza punktów krytycznych (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis - FMEA/FMECA).

Analiza przyczyn i skutków wad (ang. Failure Mode and Effects Analysis – FMEA) to metoda służąca do podwyższania jakości, której celem jest eliminacja wad procesu, wyrobu lub konstrukcji, a także czerpanie wiedzy z przeprowadzonych analiz i wykorzystywanie jej do zapobiegania występowaniu wad w nowych wyrobach i procesach. Początkowo stosowana była w przypadku produktów, które trudno było naprawiać, np. satelitów. Z biegiem czasu została przyjęta w przemyśle motoryzacyjnym, medycznym i związanym z technologią jądrową. Współcześnie stosuje się ją już we wszystkich dziedzinach w odniesieniu niemal do każdego rodzaju produktów oraz procesów, na wszystkich etapach rozwoju, począwszy od projektowania, przez produkcję aż do eksploatacji [9, 10, 11, 12, 13]. Kluczowe elementy tej metody tj. analiza FMEA i LTA zostaną omówione poniżej.

## 2.1. Metody zarządzania jakością. Analiza przyczyn wadliwości i krytyczności wad.

Metodę FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) – znaną też pod innymi nazwami: FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), zaczęto stosować w latach 60 w USA przy wyrobach dla astronautyki. Metoda polega na analitycznym ustalaniu związków przyczynowo-skutkowych powstawania potencjalnych wad produktu oraz uwzględnieniu w analizie czynnika krytyczności (ryzyka). Jej celem jest konsekwentne i systematyczne identyfikowanie potencjalnych wad produktu/procesu, a następnie ich eliminowanie lub minimalizowanie ryzyka z nimi związanego. Analizę można przeprowadzić dla całego wyrobu, pojedynczego podzespołu lub elementu konstrukcyjnego wyrobu, a także dla całego procesu technologicznego lub jego dowolnej operacji. Wyróżniamy dwa rodzaje analizy FMEA: produktu i procesu.

**FMEA produktu** ukierunkowana jest głównie na optymalizację niezawodności produktu. W jej wyniku uzyskujemy informacje o silnych i słabych punktach wyrobu. FMEA produktu można stosować w różnych fazach powstania produktu:

1. Koncepcji produktu.
2. Przed wdrożeniem do produkcji.
3. W czasie wdrażania produktu na skalę przemysłową.
4. Produkcji.
5. Eksploatacji.

Analiza może dotyczyć całego produktu, jego zespołów czy też podzespołów, a w wyjątkowych sytuacjach jego części. Analiza dotycząca całego produktu jest bardzo pracochłonna, szczególnie gdy poszczególne przyczyny wad różnych części produktu są współzależne. Jest to powód, dla którego jest ona najczęściej ograniczona do zespołów i podzespołów danego produktu. Wad produktu należy doszukiwać się w obszarach, które mogą dotyczyć:

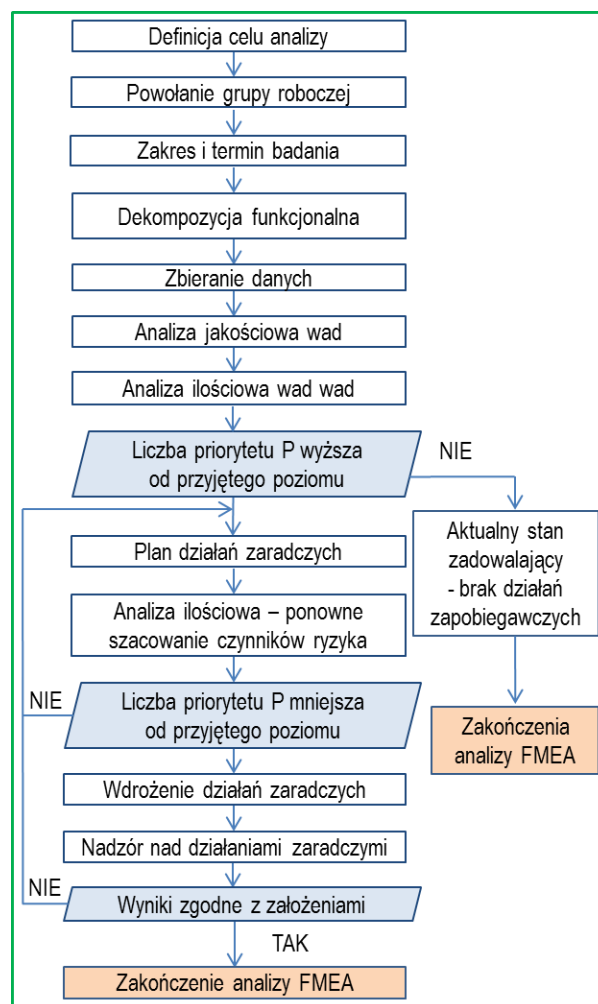
1. Funkcji, które wyrób ma realizować.
2. Niezawodności wyrobu w czasie eksploatacji.
3. Łatwości obsługi przez użytkownika.
4. Łatwości naprawy w przypadku uszkodzenia.
5. Technologii konstrukcji.

**FMEA procesu** jest prowadzona w celu rozpoznania czynników, które mogą prowadzić do ewentualnego jego zakłócenia. Czynniki te mogą być związane z:

1. Metodami.

2. Parametrami.
3. Środkami pomiarowo kontrolnymi.
4. Maszynami i urządzeniami.

FMEA procesu stosowana jest w początkowej fazie projektowania procesów technologicznych, przed uruchomieniem produkcji seryjnej (planowanie produkcji) oraz w produkcji seryjnej w celu doskonalenia procesów, które są niestabilne lub nie zapewniają uzyskania wymaganej wydajności.



Rys. 3. Etapy analizy FMEA [14]

Przeprowadzenie analizy FMEA (rys. 3) przebiega w dwóch zasadniczych etapach. Pierwszy z nich odnosi się do wstępnego przygotowania badania, natomiast drugi polega na przeprowadzeniu właściwej analizy. Etap I – przygotowanie badania – obejmuje:

1. Definicję celu analizy.
2. Powołanie grupy roboczej.
3. Zakres i termin badań.
4. Dekompozycję funkcjonalną.
5. Zbieranie danych.

Etap II – właściwa analiza – obejmuje:

1. Analizę jakościową wad.
2. Analizę ilościową wad (szacowanie czynników ryzyka).
3. Opracowanie planu działań zaradczych.
4. Nadzór nad działaniami zaradczymi.

Analiza ilościowa wad ma na celu oszacowanie czynników ryzyka. Każda wada jest oceniana liczbą całkowitą z przedziału (1 – 10) ze względu na trzy kryteria:

1. R – częstość wystąpienia wady (ryzyko wystąpienia wady).
2. Z – znaczenie wady – jak istotne znaczenie dla klienta będzie miała dana wada.

3. *W* – poziom wykrywalności – opisuje prawdopodobieństwo, że dana wada nie zostanie wykryta przez producenta i trafi do klienta.

Wskazówki do szacowania wskaźników *R*, *W* i *Z* zamieszczono w tabelach 1,2,3. Na podstawie oszacowania liczb krytyczności oblicza się liczbę priorytetu RPN (Risk Priority Number) wyznaczając ją wg wzoru i oznaczając, jako *P*:

$$P = RPN = R \cdot W \cdot Z \quad (1)$$

Tab. 1. Wskazówki do przyjmowania liczby *R*

Wystąpienie	FMEA wyrobu i konstrukcji	R	Częstość występowania wady
Nieprawdopodobne	Wystąpienie wady jest nieprawdopodobne	1	Mniej niż 1 / 1 000 000
Bardzo rzadko	Zdarza się stosunkowo mało wad	2	1 na 20 000
Rzadko	Zdarza się stosunkowo mało wad	3	1 na 4 000
Przeciętnie	Wada zdarza się sporadycznie co jakiś czas	4-6	1 na 1000 1 na 400 1 na 80
Często	Wada powtarza się cyklicznie	7-8	1 na 40 1 na 20
Bardzo często	Wady prawie nie da się uniknąć	9-10	1 na 8 1 na 2

Tab. 2. Wskazówki do przyjmowania liczby *W*

Wykrywalność wady	Prawdopodobieństwo wykrycia wady	W
Bardzo wysoka	Bardzo małe prawdopodobieństwo nie wykrycia wady zanim produkt nie opuści procesu wytwórczego. Automatycka kontrola 100% elementów, zainstalowanie zabezpieczenia.	1-2
Wysoka	Małe prawdopodobieństwo nie wykrycia wady przed zakończeniem operacji. Wada jest ewidentna, kilka wad może zostać niewykrytych.	3-4
Przeciętna	Prawdopodobieństwo średnie nie wykrycia wady produktu przed zakończeniem operacji. Ręczna kontrola utrudniona.	5-6
Niska	Prawdopodobieństwo nie wykrycia wady wysokie. Ocena subiektywna w zakresie kontroli wyrwykowej próbek.	7-8
Bardzo niska	Prawdopodobieństwo nie wykrycia wady wysokie. Punkt jest niekontrolowany. Wada jest niewidoczna.	9-10

Wartości, które może przyjmować krytyczność wady *RPN* zawierają się w przedziale od 1 do 1000. Im wartość *P* jest większa, tym ryzyko związane z daną wadą jest większe. Najczęściej ustala się pewien poziom krytyczności, czyli wartość liczby priorytetu *P*, np.  $P > 100$ , powyżej którego będą analizowane wszystkie wady.

Generalna zasada mówi, że jeśli poziom krytyczności wady jest znacząco wyższy od 1, wydawane jest zalecenie przejścia do następnego etapu, czyli podjęcie działań zapobiegawczych, np. poprzez zmodernizowanie konstrukcji lub zmiany procesu technologicznego.

Tab. 3. Wskazówki do przyjmowania liczby *Z*

Znaczenie wady dla klienta	Z	
Bardzo małe	Skutek minimalny, klient nic nie zauważa, wada nie ma jakiegokolwiek wpływu na warunki użytkowania wyrobu	1
Małe	Skutek minimalny, powodujący nieznaczne utrudnienia, Zauważalne może być umiarkowane pogorszenie właściwości wyrobu	2-3
Przeciętne	Wada wywołuje ograniczone niezadowolenie i powoduje małe utrudnienia. Wyrób nie zaspokaja potrzeb lub jest źródłem uciążliwości. Użytkownik dostrzega mankamenty wyrobu	4-6
Duże	Pojawia się niezadowolenia klienta. Koszty naprawy nieznane.	7-8
Bardzo duże	Duże niezadowolenie klienta, koszty naprawy wysokie z powodu zepsucia całości lub podzespołu.	9
Bardzo duże	Znaczenie wady jest bardzo duże, zagraża bezpieczeństwu użytkownika lub narusza przepisy prawa.	10

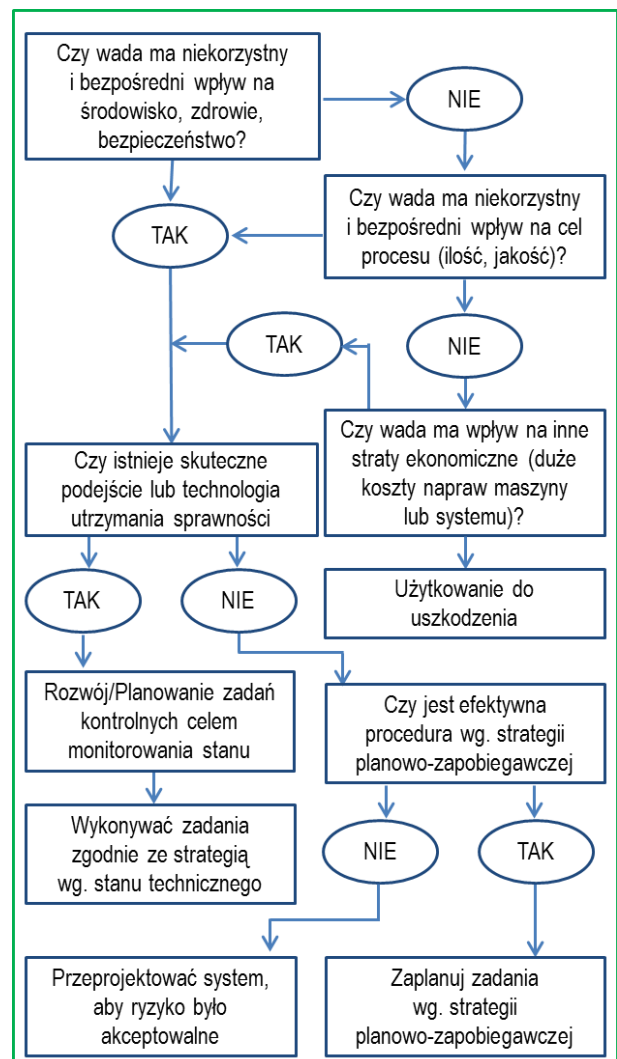
### 2.2. Drzewo logiczne RCM.

Narzędziem pomocnym wdrażania RCM jest diagram drzewa logicznego – rys.4 [15]. Dzięki jego zastosowaniu można sprawdzić, jakie błędy organizacyjne popełniono, które z działań wykonywanych przez dział utrzymania ruchu są skuteczne i należy je rozwijać, a które zawiodły i należy je zmienić oraz przeprojektować. Drzewo logiczne stosuje się w odniesieniu do każdej wady. Na podstawie analizy wyników (LTA) można dobrać odpowiednie działania korygujące i zapobiegawcze.

### 3. Kryteria doboru strategii eksploatacji

Pod pojęciem eksploatacji sprzętu wojskowego SpW rozumie się zespół celowych działań organizacyjno-technicznych i ekonomicznych podejmowanych przez personel wobec SpW oraz wzajemne relacje między nimi, od chwili wprowadzenia do SZ RP, aż do jego wycofania. Eksploatacja w Siłach Zbrojnych prowadzona jest w określonym systemie wynikającym z przyjętej, optymalnej dla sprzętu, strategii eksploatacji. Strategia eksploatacji obejmuje swoim zakresem ustalenie sposobu użytkowania oraz wsparcia i zabezpieczenia technicznego oraz relacje między nimi, w odniesieniu do przyjętych kryteriów, tj.:

1. Gotowość techniczna.
2. Sprawność techniczna.
3. Bezpieczeństwo.
4. Ekonomia eksploatacji.



Rys. 4. Analiza drzewka logicznego (LTA) – opracowanie własne na podstawie [16, 17]

Podstawowymi strategiami eksploatacji SpW stosowanymi w SZ RP są:

1. Strategia eksploatacji według zużycia ресурсu.
2. Strategia eksploatacji według stanu technicznego.

W uzasadnionych organizacyjnie i ekonomicznie specyficznych przypadkach można przyjąć inne strategie eksploatacji, uwzględniając aspekty niezawodności oraz postęp techniczny i technologiczny.

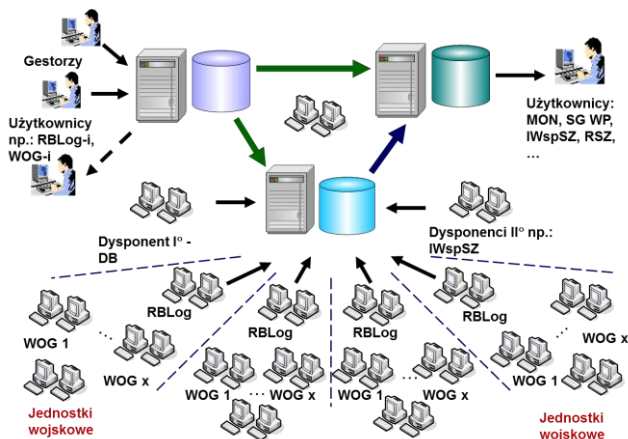
Zasadniczymi systemami eksploatacji SpW w SZ RP, wynikającymi z przyjętych strategii eksploatacji są:

1. Planowo-zapobiegawczy system eksploatacji SpW.
2. Planowo-zapobiegawczy system eksploatacji SpW z diagnozowaniem.
3. System eksploatacji według stanu technicznego.
4. System mieszany – jeden z powyższych systemów z wybranymi elementami pozostałych systemów eksploatacji.

Przyporządkowanie SpW do właściwego systemu eksploatacji wynika z ustalonych norm eksploatacyjnych, określonych normatywną lub planistyczną wartością liczbową. Normatywy ujmowane są w stosowanych katalogach eksploatacji. Wybór systemu eksploatacji jest domeną Centralnego Organu Logistycznego (COL) uzgodniony z Gestorem sprzętu wojskowego i wynikać może ze specyfiki użytkownika sprzętu, w tym oceny ryzyka niesprawności, czasu jej usuwania oraz kosztów eksploatacji. W uzasadnionych organizacyjnie i ekonomicznie przypadkach (wyczerpaniu docelowego ресурсu eksploatacji) dopuszcza się zmianę systemu eksploatacji w fazie eksploatacyjnej.

#### 4.Strategia eksploatacji według niezawodności w kontekście SZ RP

W obecnej chwili w związku z intensywnym rozwojem technologicznym prowadzi się prace nad implementacją zaawansowanych systemów informatycznych (SI) do ewidencjonowania zdarzeń księgowych, czy posiadania wiedzy na temat zapasów magazynowych (Enterprise Resource Planning – ERP) – w tym również w Siłach Zbrojnych (rysunek 5). SI jest jednym z warunków do wdrożenia eksploatacji sprzętu zgodnie ze strategią niezawodnościową (dotychczas określanej, jako „do uszkodzenia obiektu będącego w eksploatacji”). Należy zastanowić się, czy w dobie możliwości agregowania w SI znaczącej ilości danych, strategia według niezawodności może być nadal definiowana, jako strategia do uszkodzenia. Wydaje się istotne rozważenie tej strategii, jako pomocniczej w aspekcie procesu decyzyjnego dotyczącego eksploatacji SpW.



Rys. 5. Ideowy schemat systemu informatycznego

Powstanie w przedsiębiorstwach i jednostkach wojskowych sieciowego systemu informacyjnego powoduje potrzebę zmiany spoj-

zenia na strategię eksploatacji wg niezawodności. Wykorzystując doświadczenia eksploatacyjne w ramach tej samej grupy obiektów technicznych eksploatowanych w różnych miejscach i odległościach, ale w zbliżonych warunkach eksploatacyjnych zasadne jest agregowanie tego typu informacji (bazy danych tworzące bazy wiedzy). Informacje mogą być wykorzystywane do wyznaczania m.in. rozkładów uszkodzeń obiektów technicznych, jako całości oraz podzespołów i wykorzystanie tych informacji do podejmowania decyzji eksploatacyjnych (rysunek 6) lub o wycofaniu SpW z Sił Zbrojnych na skutek nieopłacalności jego dalszej eksploatacji.

#### Proces pozyskiwania wiedzy z baz danych (ang. knowledge discovery in databases)

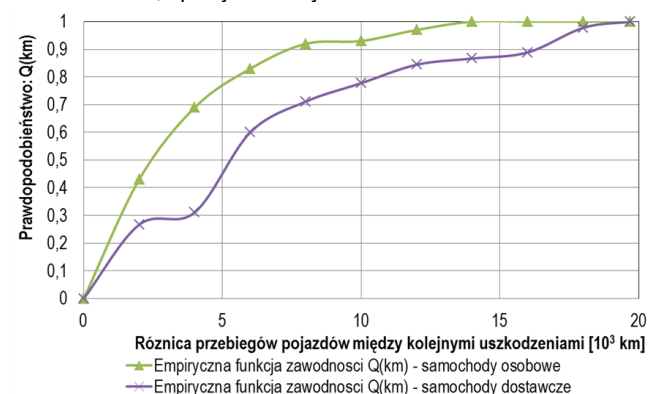


Rys. 6. Proces pozyskiwania wiedzy z baz danych

Wykorzystanie danych zawartych w zintegrowanych systemach daje podstawę do budowania modułu symulacyjnego pozwalającego, na podstawie dystrybucji zawodności sprzętu Q, określać z określonym prawdopodobieństwem możliwość wykonania zadania przez sprzęt wojskowy. Znając prognozę wykorzystania ресурсu można określić położenie punktu prawdopodobieństwa uszkodzenia na krzywej zawodności po wykonaniu określonego ресурсu w funkcji czasu lub przebiegu. Nie narażając przedsiębiorstwa na dodatkowe koszty, np. ewakuację czy utratę możliwości wykonania zadania. Do oszacowania wykorzystania ресурсu mogą zostać wykorzystane następujące metody:

1. Metoda Najmniejszych Kwadratów.
2. Trend wykładniczy i wielomianowy.
3. Wygładzanie wykładnicze.
4. Metody mieszane.
5. Modele addytywne i multiplikatywne.
6. Model przyczynowo-skutkowy.
7. Model giełdowy.

Dla zobrazowania możliwości wykorzystania charakterystyk niezawodności w procesach decyzyjnych kierowania eksploatacją przedstawiono na rys. 7 dystrybucję zawodności dla samochodów osobowych i dostawczych w wybranym wojskowym podsystemie eksploatacji. Charakterystyki te z dostateczną dla zastosowań praktycznych dokładnością mogą być opisane typowymi rozkładami niezawodności, np. wykładniczym.



Rys. 7. Dystrybucja zawodności dla grupy pojazdów

## Podsumowanie

Artykuł zawiera przegląd strategii eksploatacji sprzętu. Autorzy zwrócili uwagę na zależność wyboru strategii eksploatacji od rozwoju technologicznego. Istotną część artykułu jest poświęcona strategii, która ma coraz większe znaczenie w procesach eksploatacji sprzętu – RCM. Eksploatowanie sprzętu zazwyczaj nie jest związane z wykorzystaniem zasad jednej strategii eksploatacji. Istotne jest spojrzenie na obiekt lub system według koncepcji RCM – badania mocnych i słabych stron analizowanego obiektu czy problemu i określenie ich wpływu na system, konsekwencji, jakie mogą powodować, a następnie dostosowanie strategii eksploatacji indywidualnie do maszyny, podzespołu, części zamiennej czy realizowanego procesu. W tym przypadku istotne jest posiadanie szerokiej wiedzy o analizowanym obiekcie. Wiedzy, która wpływa m.in. ze zgromadzonych w bazach danych informacji dotyczących niezawodności obiektu, w szczególności charakteru rozkładu uszkodzeń.

## Bibliografia:

1. Legutko S. Trendy rozwojowe utrzymania ruchu urządzeń i maszyn. Eksploatacja i niezawodność 2/2009.
2. Jasiulewicz-Kaczmarek M., Współczesne koncepcje utrzymania ruchu infrastruktury technologicznej przedsiębiorstwa: Koncepcje zarządzania systemami wytwórczymi, Poznań: Wydawca - Instytut Inżynierii Zarządzania Politechniki Poznańskiej, 2005: 127-134.
3. Moubray J., Maintenance management – a new paradigm, Maintenance, 1996.
4. Piersiala S., Trzecieliński S., Systemy utrzymania ruchu, w: Koncepcje zarządzania systemami wytwórczymi, Poznań: Wydawca Instytut Inżynierii Zarządzania Politechniki Poznańskiej, 2005: 114-126.
5. Wykład. Barański R., AGH, „Diagnostyka maszyn pomiaru”
6. Legutko S. „Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń”, WSiP, Warszawa 2004.
7. Napiórkowski J., Drożyner P., i inni, Podstawy budowy i eksploatacji pojazdów i maszyn, UWM, Olsztyn 2013.
8. Frank G., Chockie P.E. Alan, Aging Management and Life Extension in the US Nuclear Power Industry, October 2006.
9. Breiing A. J., Critical consideration and improvement of the FMEA, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Switzerland 2002.
10. Gołaś H., Mazur A., Wdrażanie systemu zarządzania jakością, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011.
11. Hamrol A., Mantura W., Zarządzanie jakością teoria i praktyka, PWN, Poznań 1990.
12. Hassan A., Siadat A., Dantan J., Patrick M., Conceptual process planning – an improvement approach using QFD, FMEA, and ABC methods, Robotics and Computer – Integrated Manufacturing 2009.
13. Werbińska-Wojciechowska S., Narzędzia i metody analizy uszkodzeń obiektu technicznego. Przyczyny i rodzaje uszkodzeń, wykład, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2013.
14. <http://www.zarz.agh.edu.pl/bsolinsk/fmea.html>
15. Misztal A., Connecting and applying the FTA and FMEA methods together, w: Some problems and methods of ergonomics and quality management, red. A. Borucki, L. Pacholski, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010, s. 153–163.,
16. Mikołajczyk J., „Wykorzystanie analizy FMEA we współczesnej koncepcji utrzymania ruchu – RCM”, „Zeszyty naukowe Politechniki Poznańskiej, nr 61, „Organizacja i zarządzanie” 2013.
17. Islam H. Afefy, “Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application: A Case Study”, Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Fayoum University, Al Fayum, Egypt, Engineering, 2010, 2, 863-873

### The essence of the exploitation strategy according to reliability criteria

The article discusses the strategies for using the equipment. The authors remind the evolution of the development of exploitation strategies. The exploitation strategy according to reliability and the possibilities of its application in the aspect of supporting the decision process of equipment operation is analyzed. The RCM strategy is discussed, which can be successfully applied in the aspect of the reliability of the implementation of, among others, production processes in the enterprise.

**Keywords:** Reliability, RCM (Reliability Centered Maintenance), maintenance strategies evolution.

#### Autorzy:

**dr hab. inż. Józef Pszczółkowski**, prof. WAT – Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Wydział Mechaniczny: 00-908 Warszawa, ul. gen. Witolda Urbanowicza 2. tel. 261 837 206, email: jozef.pszczolkowski@wat.edu.pl

**ppłk mgr inż. Tomasz Goliasz** – Ministerstwo Obrony Narodowej: 00-608 Warszawa, ul. Aleja Niepodległości 218, tel. 736-941-991, tgoliasz@mon.gov.pl.