

## OPTYMALIZACJA EKSPLOATACJI MASZYN I URZĄDZEŃ

Adam PIETRZYK  
Tadeusz UHL

Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
Al. Mickiewicza 30. [Tuhl@rob.wibro.agh.edu.pl](mailto:Tuhl@rob.wibro.agh.edu.pl)

### Streszczenie

W pracy wskazano możliwości optymalizacji decyzji eksploatacyjnych dzięki adaptacji metodologii RCM (ang. Reliability-centered Maintenance), która poprzez integrację wielu dyscyplin nauki i techniki pozwala na efektywne technicznie i ekonomicznie planowanie działań serwisowych z uwzględnieniem warunków eksploatacji oraz oczekiwań użytkowników. RCM jest obecnie najpopularniejszą i najbardziej efektywną strategią zarządzania serwisem. Podstawy RCM zostały stworzone w latach 60-tych w przemyśle lotniczym USA. Dzięki serwisowi niezawodnościowemu uzyskano zmniejszenie kosztów eksploatacji samolotów przy jednoczesnej poprawie poziomu bezpieczeństwa lotów. Zaletą analizy RCM jest to, że może być przeprowadzona zarówno dla obiektów nowych jak i istniejących, a nawet już na etapie projektowania. W pracy przedstawiono propozycję oprogramowania ułatwiającego przeprowadzenie takich analiz oraz umożliwiającego wykonanie symulacji techniczno-ekonomicznych efektów proponowanych decyzji.

Słowa kluczowe: RCM, Analiza ryzyka, Krytyczność

### ASSET MAINTENANCE OPTIMIZATION

This paper presents possibilities of maintenance optimization with applying Reliability-centered Maintenance based Methodology. RCM is a strategy that allow technically and economically effective maintenance task scheduling with respect to the users expectations in existing operating context. RCM is at moment the most popular and effective asset management strategy. RCM was developed over a period of thirty years in aviation industry. Applying RCM based techniques decreases flying costs and increases safety level. One of the benefits of RCM analysis is that it can be perform on the new or existing assets. RCM analyse can be applied even in the design phase. This publication presents software that assists in the analysis process, and allows to make economical simulations.

Keywords: RCM, Risk analysis, Criticality

### 1. WSTĘP

W przedsiębiorstwach produkcyjnych na całkowity koszt produkcji składa się wiele czynników. Do głównych należą koszty materiałowe, koszty pracy, a także koszty eksploatacji, w tym koszty wykorzystania i serwisowania urządzeń wykorzystywanych w procesie produkcji. Koszty te związane są z działaniami mającymi na celu zapewnienie oczekiwanej zazwyczaj dyspozycyjności zapewniającej ciągłość produkcji, różnej dla różnych branż przemysłu. Zbiór tych działań jest wyrazem realizacji przyjętej strategii eksploatacyjnej przedsiębiorstwa. Określenie strategii sugeruje że mamy do czynienia ze świadomym procesem decyzyjnym, który wymaga od właścicieli przedsiębiorstwa określenia celów, przydzielenia budżetu przeznaczonego na ich realizację a następnie ciągłej adaptacji do zmieniających się warunków technicznych oraz ekonomicznych.

Obecnej dysponujemy szeroką gamą różnych technik pozwalających na zapewnienie realizacji wyznaczonych celów eksploatacyjnych. Do technik tych możemy zaliczyć narzędzia diagnostyczne [2], modele niezawodnościowe i statystyczne [5], metody symulacyjne [5] oraz techniki ekonomicznej eksploatacji urządzeń [4]. Poważnym ograniczeniem w ich wykorzystaniu jest jednak wysokość nakładów finansowych jakimi dysponuje przedsiębiorstwo, co wymusza szczególnie uważny i racjonalny wybór przyjmowanych rozwiązań. Ważne jest aby dostępne środki techniczne wykorzystywać w jak najbardziej efektywny sposób. Oznacza to że konieczne jest zarówno na poziomie lokalnym (pojedynczych urządzeń) jak również globalnie (w skali całego przedsiębiorstwa) poszukiwanie rozwiązań zapewniających oczekiwaną niezawodność procesów i urządzeń jak najmniejszym kosztem. Tworząc plany eksploatacje należy rozwiązać wielokryterialny problem decyzyjny dla którego trudno jest wskazać

optymalne rozwiązanie. Problem ten należy potraktować interdyscyplinarnie, gdyż łączy on zagadnienia czysto inżynierskie, takie jak nauka o niezawodności, statystyka, czy informatyka z zagadnieniami z zakresu organizacji i zarządzania. Dzięki wykorzystaniu komputerów, analizie modeli statystycznych i niezawodnościowych oraz wykorzystaniu wiedzy eksperckiej możliwe jest wybranie najlepszych decyzji dla przedsiębiorstwa.

Niniejsza praca przedstawia możliwości optymalizacji decyzji eksploatacyjnych dzięki adaptacji metodologii RCM, która tworzy formalne podstawy dla integracji działań z wyżej wymienionych dyscyplin w celu wyboru najlepszym technik serwisu odpowiadających warunkom eksploatacji oraz oczekiwaniom użytkowników.

## **2. RCM - SERWISOWANIE ZORIENTOWANE NA NIEZAWODNOŚĆ**

Na przestrzeni lat sposób eksploatacji urządzeń ulegał ciągłym zmianom. Pierwsze urządzenia produkcyjne ze względu na prostą konstrukcję mechaniczną oraz bardzo skromne środki techniczne podlegały jedynie bieżącej konserwacji oraz naprawie gdy nastąpiło uszkodzenie. Urządzenia z tamtego okresu były z reguły bardzo przewymiarowane, a także pozbawione elektroniki, automatyki i sterowania. Dodatkowym czynnikiem powodującym brak zainteresowania planowym serwisem był niewielki stopień mechanizacji przedsiębiorstw.

Sytuacja ta uległa znacznej zmianie po drugiej wojnie światowej. Wraz z rozwojem przemysłu elektronicznego wzrósł stopień złożoności i precyzji wykonania urządzeń. Przedsiębiorstwa stawały się coraz bardziej zmechanizowane co spowodowało zwiększenie opłacalności planowego zapobiegania uszkodzeniom maszyn. Dawało to możliwość minimalizowania kosztów związanych z przestojami oraz zwiększania bezpieczeństwa pracy. W latach 50-80 strategie serwisowe nakazywały przyjęcie terminów planowych zapobiegawczych remontów oraz wymian urządzeń lub ich elementów mający na celu zapewnienie wymaganej bezawaryjności (ang. Preventive Maintenance). Podejście takie oparte było na opinii inżynierów lub danych statystycznych udostępnianych przez producentów. Rozwiązanie takie było najlepszym rozwiązaniem w tamtych latach, gdyż pozwalało na programowanie żądanej niezawodności i znaczne ograniczenie kosztów i czasów przestojów. Jakkolwiek są to niewątpliwie zalety to z rozwiązaniem takim wiążą się również wady. Po pierwsze określenie czasów planowych wymian i remontów wiąże się z założeniem że znamy charakterystykę zużycia danego elementu, charakterystyka ta zawiera wyraźny punkt wzrostu prawdopodobieństwa uszkodzenia, po drugie charakterystyki niezawodnościowe producenta nie uwzględniają specyficznych warunków eksploatacji które mogą wystąpić u konkretnego użytkownika.

W przypadku drogich i odpowiedzialnych obiektów lub urządzeń uszkodzenie lub awaria może wiązać się z poważnymi konsekwencjami. Z tego powodu koniecznym staje się aktywne zarządzanie procesem eksploatacji. Należy przez to rozumieć taką realizację eksploatacji by uniknąć nieprzewidzianych awarii. Niezawodność jest wskaźnikiem ściśle związanym z awaryjnością. Zwiększanie niezawodności systemu, nie jest działaniem jednorazowym lecz częściej procesem zmierzającym do utrzymania niezawodności na oczekiwanym poziomie. Można to osiągnąć poprzez właściwe serwisowanie. Pierwszą gałęzią przemysłową która w ten sposób zwiększała ogólną niezawodność był przemysł lotniczy. Stało się tak na skutek konkurencji oraz coraz surowszych norm bezpieczeństwa. Od lat 60-tych w przemyśle lotniczym rozwijały się techniki nazywane obecnie RCM (ang. Reliability-centered Maintenance)[1]. Za ich początek uważa się raport opracowany na zlecenie Amerykańskiego Departamentu Obrony Lotniczej opracowanego przez Stanleya Nowlana [1]. Raport ten stał się podstawą sformułowania ogólnych wskazówek prowadzenia serwisu zorientowanego na niezawodność. Dzięki wykorzystaniu tych technik, w ciągu ostatnich lat poziom bezpieczeństwa lotów w USA wyraźnie się podniósł przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów serwisu statków powietrznych.

W przypadku bardzo skomplikowanych procesów lub urządzeń charakterystyka ich awaryjności ma charakter losowy, bądź jest ona złożeniem wielu różnych charakterystyk [1]. Dla wielu urządzeń elektronicznych oraz urządzeń o złożonej budowie charakterystyki takie możemy uzyskać jedynie w przybliżeniu na drodze symulacji.

W takich przypadkach sztywne ustalenie czasów resursów z pominięciem analizy statystycznej, wiedzy posiadanej o funkcjonowaniu obiektu, a także symulacji pozwalającej na poszerzenie tejże wiedzy, może okazać się zupełnie nieefektywne i przynieść efekty odwrotne od zamierzonych. Jednocześnie błyskawiczny rozwój narzędzi diagnostycznych doprowadził do rozpowszechnienia technik ciągłego lub okresowego monitorowania oraz prognozowania stanu urządzeń, co pozwala na precyzyjne wyłączenie urządzenia wtedy gdy ryzyko wystąpienia awarii osiągnie poziom nie akceptowany przez użytkownika (ang. Predictive Maintenance).

Techniki te mimo swoich zalet są trudne do wdrożenia, gdyż wymagają znajomości charakterystyki uszkodzenia, wykwalifikowanego personelu oraz specjalistycznego sprzętu i oprogramowania co powoduje, że są z reguły bardzo kosztowne. Ich stosowanie wymaga znacznych inwestycji zwiększających budżet eksploatacyjny, a więc także zwiększających koszty produkcji. Sytuacja taka jest dla przedsiębiorstwa bardzo niekorzystna zwłaszcza wtedy gdy te środki diagnostyczne są wykorzystywane w sposób niepełny, nie przynoszący oczekiwanych korzyści.

W związku z tym do głównych zadań stojących przed współczesnymi inżynierami eksploatacji powinniśmy zaliczyć:

- umiejętność właściwego wyboru odpowiednich technik eksploatacyjnych
- umiejętność określenia i programowania zakładanej niezawodności procesów
- umiejętność realizacji oczekiwań właścicieli oraz zapewnienia bezpieczeństwa i czystości środowiska, wymaganej również przez odpowiednie przepisy
- umiejętność znajdowania rozwiązań najbardziej efektywnych ekonomicznie w zakładanej perspektywie czasu

Nowoczesne prowadzenie polityki eksploatacyjnej wymaga od nas nie tylko znajomości technik diagnostycznych, lecz przede wszystkim właściwego ich stosowania.

Jedną z najczęściej stosowanych obecnie strategii eksploatacyjnych jest RCM. Jest to metodologia integrująca szereg różnych technik, pozwalająca spełnić sformułowane powyżej oczekiwania. RCM pozwala zapewnić żadaną niezawodność procesu (lub urządzenia) wymuszając jednocześnie stosowanie najbardziej efektywnych technicznie i ekonomicznie technik. RCM można zdefiniować jako logiczny ciąg analiz wykorzystywany do określenia wymagań serwisowych dowolnego urządzenia, w warunkach jego pracy (eksploatacji) zapewniających ciągłą realizację szeroko rozumianych oczekiwań użytkownika. Warto zauważyć że RCM formułuje cele eksploatacyjne na poziomie funkcji a nie na poziomie urządzenia. Inaczej mówiąc, celem nie jest zapewnienie całkowitej niezawodności urządzenia jako takiego, lecz zapewnienie takiej jego niezawodności jakiej wymaga realizacja funkcji dla której urządzenie to jest wykorzystywane w danych warunkach. W rzeczywistych sytuacjach może się bowiem zdarzyć tak, że koszt osiągnięcia wysokiej niezawodności urządzenia nie przełoży się na korzyści płynące ze zmniejszonych przestoju, itp.

Aby podjąć właściwe decyzje eksploatacyjne musimy odpowiedzieć na siedem podstawowych pytań:

1. **Jakie są funkcje urządzenia oraz granice ich realizacji?**
2. **W jaki sposób urządzenie przestaje spełniać swoje funkcje?**
3. **Jakie są tego przyczyny?**
4. **Jakie objawy towarzyszą uszkodzeniom funkcjonalnym?**
5. **Jakie znaczenie ma dla nas każde uszkodzenie?**
6. **Co należy zrobić by przewidzieć lub zapobiec uszkodzeniu?**
7. **Co zrobić gdy nie możemy przewidzieć lub zapobiec uszkodzeniu?**

Warto podkreślić że ostatnie pytanie jest obligatoryjne i wymusza na ogół wprowadzenie modernizacji obiektu lub procesu nim kierującego

gdy nie możemy znaleźć odpowiednich działań zapobiegawczych.

Stosując logikę RCM, to znaczy analizując wyniki odpowiedzi na powyższe siedem pytań, możemy dokonać optymalizacji dotychczasowych planów eksploatacyjnych lub sformułować nowe zapewniając jednocześnie ich maksymalną efektywność i dostosowanie do specyficznych potrzeb użytkownika.

### 3. ANALIZA RYZYKA W PODEJMOWANIU DECYZJI DIAGNOSTYCZNYCH

Analiza ryzyka jest kluczowym elementem procesu analiz RCM, warunkującym decyzje eksploatacyjne. Z eksploatacją każdego urządzenia technicznego związane jest ryzyko (wystąpienia katastrofy, degradacji środowiska, itp.). Celem prowadzenia analizy ryzyka w RCM jest wskazanie najbardziej niebezpiecznych elementów systemu, oraz określenie ryzyka jakie niosą ich awarie. Można wyróżnić trzy kategorie ryzyka [4]:

- ryzyko psychologiczne (społeczne)
- ryzyko techniczne
- ryzyko ekonomiczne

Należy to uwzględnić w procesie identyfikacji ryzyka i przy podejmowaniu działań zapobiegawczych. Dla potrzeb inżynierskich należy ustalić kryteria i miary oceny ryzyka. Norma [10] podaje że: bezpieczeństwo wytworu oraz jego otoczenia to pozostawanie w stanie ryzyka nie większego od wartości kryterialnej. Ryzyko definiowane jest jako iloczyn uszkodzenia i prawdopodobieństwa, z którym się pojawia to uszkodzenie. Oceny bezpieczeństwa dokonuje się, gdy znany jest jakościowy i ilościowy opis systemu. Na etapie wartościowania należy z reguły ograniczyć się do oceny uproszczonej, jednak tak zbudowanej aby w miarę napływu informacji o wyrobie powstał ilościowy system oceny. Ogólne zasady postępowania przy analizie złożonych układów można znaleźć w [6], oraz w [11]. Teoria niezawodności dostarcza nam podstaw do ilościowej oceny ryzyka. Do głównych metod analizy ryzyka zaliczyć możemy:

- FMEA (ang. Failure Mode and Effects Analysis), analiza rodzajów i skutków awarii
- FMECA (ang. Failure Mode, Effects and Cause Analysis), analiza rodzajów, skutków i przyczyn awarii
- Drzewo uszkodzeń i Drzewo zdarzeń krytycznych budowane dla danego obiektu

Każda z tych metod ma swoje zalety i wady a także ograniczenia związane z jej zastosowaniem [7].

RCM jako metodologia nie narzuca konkretnych rozwiązań jednak powszechnie wykorzystuje się dwie pierwsze z przytoczonych metod. W analizach RCM jako ryzyko rozumie się iloczyn ważności i częstości (lub prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia):

$$\text{RYZYKO} = \text{WAŻNOŚĆ} * \text{CZĘSTOŚĆ} \quad (1)$$

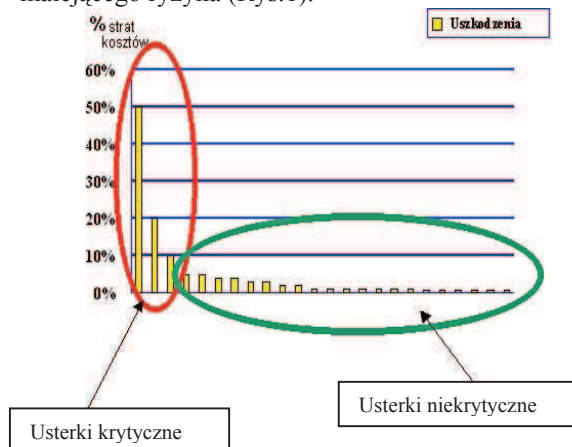
Ważność jest terminem związanym z dotkliwością efektów wystąpienia uszkodzenia funkcjonalnego. Jest to pojęcie szerokie, mieszczące zarówno koszty czasy przestoju jak również wpływ na bezpieczeństwo ludzi i środowisko naturalne. Częstość występowania uszkodzenia funkcjonalnego jest związana z fizyczną przyczyną uszkodzenia dla konkretnego składnika analizowanej instalacji. Celem metod ilościowej analizy ryzyka jest jak najdokładniejsze wyznaczenie prawdopodobieństwa (częstości) występowania uszkodzeń funkcjonalnych a co za tym idzie precyzyjne i liczbowe wyznaczenie poziomu ryzyka z nimi związanego. Ponieważ metody te na ogół korzystają z danych statystycznych, są znacznie trudniejsze w implementacji.

W związku z trudnościami w stosowaniu ilościowych metod analizy ryzyka, zwykle jako podstawową stosuje się metodę jakościową, w której określa się szereg logicznych skal ważności i jedną skalę częstości. Ostatecznie na podstawie porównania przyjętych macierzy krytyczności (Tab.1), wyrażającej strategię użytkownika i otrzymanych poziomów ryzyka wnioskuje się o krytyczności urządzenia. Taką analizę ryzyka prowadzi się dla wszystkich rozpoznanych oraz przewidywanych uszkodzeń funkcjonalnych i ich przyczyn.

Tab1. Tabela krytyczności

częstość usterki	ważność			
	bardzo mała	mała	duża	bardzo duża
rzadka		Nie krytyczne		
umiarkowana		Opinia eksperta		
częsta		Krytyczne		

W wyniku analizy otrzymuje się poziomy ryzyka związane z poszczególnymi przyczynami uszkodzeń funkcjonalnych wskazujące na krytyczność danej przyczyny uszkodzenia. Pomocny może być w tym wykres Pareto szeregujący usterki w porządku malejącego ryzyka (Rys.1).



Rys. 1. Wykres Pareto (według malejącego ryzyka) Jest to metoda ekspercka, szczególnie efektywna w przypadku obiektów nowych oraz przy modernizacji istniejących już systemów

#### 4. ZASTOSOWANIE RCM DO PROJEKTOWANIA UKŁADÓW MONITOROWANIA

RCM z definicji ma na celu wskazanie wymagań eksploatacyjnych urządzeń lub całych obiektów technicznych w warunkach ich eksploatacji. Jest to fundamentalne stwierdzenie podkreślające że warunki użytkowania urządzenia mają niezwykle istotny wpływ na sposób jego serwisowania. W zależności od tych warunków dwa takie same urządzenia mogą być serwisowane w całkowicie odmienny sposób. Jest to związane z oczekiwaniami użytkowników lub z tym, że konsekwencje ich uszkodzenia mogą być różne (różne są poziomy ryzyka z nimi związane). Wpływa to na konkretne decyzje eksploatacyjne (stosowanie monitoringu, planowych remontów, planowych wymian, okresowych kontroli lub przyjęcie eksploatacji do uszkodzenia itp.).

Jednym z elementów zmniejszenia ryzyka awarii oraz zmniejszenia kosztów napraw jest instalowanie dla odpowiedzialnych obiektów systemów monitorowania i diagnozowania ich stanu oraz zużycia. Przez system monitorowania stanu rozumie się wyposażenie techniczne i procedury obliczeniowe dla zbierania i analizy informacji związanej ze stanem i funkcjonowaniem poszczególnych części i podzespołów monitorowanego urządzenia w celu wykrycia początkowego stadium uszkodzenia lub zużycia, które może prowadzić do awarii. Przez proces diagnozowania rozumie się obecnie określenie bieżącego stanu technicznego, określenie przyczyn zaistnienia obecnego stanu, oraz określenia horyzontu czasowego przyszłej zmiany stanu technicznego [2]. Do diagnozowania stanu urządzenia w diagnostyce eksploatacyjnej wykorzystywane są symptomy stanu związane zarówno ze zmiennymi procesowymi takimi jak ciśnienie, temperatura, moc jak również procesy resztkowe, które w sposób nieodłączny towarzyszą eksploatacji każdej maszyny. Do procesów tych zalicza się procesy termiczne, elektryczne, a przede wszystkim wibroakustyczne. Umożliwiają one prowadzenie procesu diagnozowania bez wyłączania urządzenia z ruchu.

W zakresie diagnostyki eksploatacyjnej można wyróżnić dwa sposoby wnioskowania diagnostycznego [2]:

- oparte o symptomy diagnostyczne oraz wykorzystanie relacji symptom – stan
- oparte na modelu, wykorzystujące relacje stan – parametry modelu.

Do realizacji wnioskowania stosuje się coraz częściej systemy doradcze umożliwiające diagnozowanie wielu obiektów w sposób automatyczny lub poprzez wspomaganie decyzji operatora. Konstrukcja systemów monitorowania w chwili obecnej jest konstrukcją modułową umożliwiającą konfigurowanie układu w zależności od wymagań użytkownika. Dotyczy to zarówno



sprzętu jak i oprogramowania. Jednak w praktyce koszty takiego systemu w wielu przypadkach są zbyt duże aby mógł on być montowany na obiekcie w pełnej wersji. Stąd wynika potrzeba opracowania procedur projektowania systemów monitorowania, które umożliwiłyby dostosowanie systemu do potrzeb użytkownika oraz do rozmiaru uzasadnionego ekonomicznie.

Urządzenia monitorujące pozwalają zwiększyć bezpieczeństwo oraz niezawodność procesów i urządzeń technicznych, co przyczynia się do zwiększenia ich efektywności. Dobór systemów monitorowania dla danej instalacji powinien być dokonany z uwzględnieniem:

- rodzaju monitorowanego obiektu
- znaczenia monitorowanego obiektu dla całego procesu
- ryzyka jakie niesie awaria monitorowanego obiektu
- kosztów instalacji i eksploatacji systemu monitorowania

W wyniku przeprowadzonej analizy ryzyka, procedura RCM wskazuje nam konkretne miejsca w instalacji gdzie monitorowanie stanu urządzenia może dać poważne korzyści zarówno ekonomiczne, techniczne jak również podnoszące poziom bezpieczeństwa.

Dzięki wykorzystaniu zebranych informacji, można sformułować modele matematyczne, np. PHM (ang. Proportional Hazards Model) [7] i na tej podstawie określić grupę czynników które najistotniej wpływają na niezawodność systemu. Monitorowanie tych czynników daje najlepsze efekty a także pozwala na określenie prognoz stanu obiektu w następnych okresach użytkowania. Na tej podstawie można decydować o strategii eksploatacyjnej w nadchodzących okresach czasu [9].

Przy wyborze układów monitorowania bierzemy również pod uwagę dane o charakterze uszkodzenia, relacji symptom-uszkodzenie wymagających ciągłego pomiaru oraz wiele innych czynników. Wszystkie te informacje pozwalają na dobranie najbardziej właściwego rodzaju układu monitorowania, określenie jego rozmiaru oraz potencjalnej korzyści jaką przyniesie jego zastosowanie.

## **5. OPROGRAMOWANIE DLA REALIZACJI PROCEDURY RCM**

Ze względu na specyfikę procesu analiz RCM specyficzna jest też rola oprogramowania i komputerów w procesie wspomagania przygotowywania takich analiz. RCM określa jedynie zasady postępowania pozostawiając szczegóły realizacji decyzji analizującego. Należy

również podkreślić że to analizujący jest główną osobą ponoszącą odpowiedzialność za efekt całego przedsięwzięcia. Dlatego zadaniem oprogramowania jest pomoc w zebraniu potrzebnych informacji, wyznaczeniu żądanych wskaźników i zasugerowaniu właściwych rozwiązań. Stanowi ono również bazę danych z informacjami z których w każdej chwili będzie mógł on skorzystać. Komputerowy system wspomagający analizę RCM powinien mieć cech systemu eksperckiego, umożliwiającego przeprowadzenie szeregu analiz i symulacji, pozostawiając jednak ostateczną decyzję osobie analizującej.

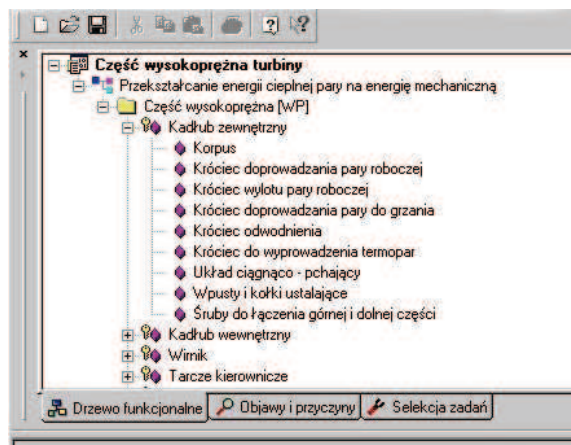
Obecnie można zauważyć tendencję do integrowania systemów RCM jako części ogólnego systemu planowania eksploatacji CMMS (ang. Computer Maintenance Management System), co prowadzi do efektywniejszego zarządzania zasobami magazynowymi przedsiębiorstwa, oraz pozwala na bezpośrednią implementację wyników i zaleceń analiz RCM w programie serwisowym, a także kontrolowanie ich efektów bezpośrednio za pomocą systemu.

### **5.1. Przykład implementacji systemu wspomagania analiz RCM**

Wykorzystując środowisko MSAccess oraz VisualC++ stworzony został program umożliwiający gromadzenie danych niezbędnych do przeprowadzenia analiz RCM których celem była optymalizacja planów remontowych turbiny parowej. Omawiany przykład pokazuje kolejne etapy analizy części wysokoprężnej turbiny.

Pierwszym etapem analiz jest określenie granic analizy to znaczy wyznaczenie funkcji procesowych oraz urządzeń (lub grup urządzeń) poddanych analizie. Wyboru tego dokonuje zespół ekspertów na podstawie analizy dokumentacji techniczno-ruchowej obiektu oraz informacji o usterkowości systemu. W analizach RCM podstawowym kryterium oceny działania systemu są funkcje i związane z nimi osiągi. Dopiero po zdefiniowaniu funkcji i oczekiwań z nimi związanych przechodzi się do analizy struktury technicznej na określonym poziomie szczegółowości.

W programie przyjęto czterostopniową hierarchię. Analizowany system tworzy hierarchiczną strukturę logiczną, w której na samej górze znajdują się funkcje procesowe a drugi stopień stanowią grupy funkcjonalne odpowiadające za ich realizację. Następnie do każdej grupy funkcjonalnej przypisujemy zespoły urządzeń odpowiedzialne za realizację funkcji każdej z grup funkcjonalnych a do każdego urządzenia jego składniki (Rys.2). Podział taki wyraźnie rozgranicza elementy struktury funkcjonalnej od struktur technicznych.



Rys.2. Struktura analizowanego obiektu

Dokładne rozpoznanie i opisanie funkcji sytemu jest bardzo ważne, gdyż ma wpływ na późniejsze określanie uszkodzeń. System jako całość realizuje zazwyczaj jedną podstawową funkcję na realizację której składa się wiele mniejszych podfunkcji. Wszystkie one muszą zostać dokładnie opisane i określone. RCM szczegółowo określa jednolity sposób definiowania i opisu funkcji. Przyjmuje się, że definicja funkcji powinna składać się z czasownika, obiektu oraz oczekiwanego poziomu granicznego. Przykładowo podstawowa funkcja pompy wody może być zdefiniowana następująco: Pompować wodę ze zbiornika X do zbiornika Y z wydajnością nie mniejszą niż 800 litrów na minutę. Prezentowane oprogramowanie pozwala na określenie funkcji procesowych oraz funkcji grup funkcjonalnych ( podfunkcji) i dokładne, opisowe zdefiniowanie oczekiwań co do ich realizacji. Dysponując jasno określoną strukturą funkcjonalną łączy się ją ze strukturą techniczną poprzez przypisanie grupom funkcjonalnym związanych z nimi urządzeń oraz składników. Z urządzeniami związane są dwa rodzaje informacji: techniczne i ekonomiczne. Do grupy informacji technicznych możemy zaliczyć charakterystyki dotyczące częstości występowania uszkodzeń, czasów przestoju, czasów napraw itp. Informacjami ekonomicznymi są średnie koszty związane z godziną przestoju i naprawy, koszt urządzenia, koszt magazynowania itp. Wszystkie te informacje są wykorzystywane w kolejnej fazie analiz jaką jest analiza ryzyka. Oprogramowanie pozwala nam rejestrować historię eksploatacyjną na którą składają się zarówno czasy zdarzeń eksploatacyjnych jak również ich efekty i skutki. Dzięki listom standardowych efektów, częstości i przyczyn uszkodzeń, które mogą być w miarę potrzeb rozszerzane szybko i łatwo możemy opisać nowe zdarzenia eksploatacyjne. Aby dokonać analizy ryzyka określa się skalę ważności objawów powodujących uszkodzenia funkcjonalne i graniczne poziomy ryzyka świadczące o krytyczności przyczyn. (Rys.3)

Rys.3. Kryteria analizy ryzyka (analizy krytyczności)

Uszkodzenie uznaje się za ważne jeśli jego efekty są większe od przyjętych wartości granicznych w danej kategorii (bezpieczeństwo, koszty, dyspozycyjność itd.). Oprogramowanie pozwala nam określić te wartości poprzez:

- zdefiniowanie maksymalnego dopuszczalnego przez użytkownika kosztu związanego z wystąpieniem uszkodzenia,
- zdefiniowanie maksymalnego dopuszczalnego przez użytkownika czasu przestoju bloku będącego wynikiem uszkodzenia
- w przypadku bezpieczeństwa, wpływu na środowisko oraz reaktywności kierujemy się opinią eksperta, który przypisuje wagi w skali 0-10 pkt.

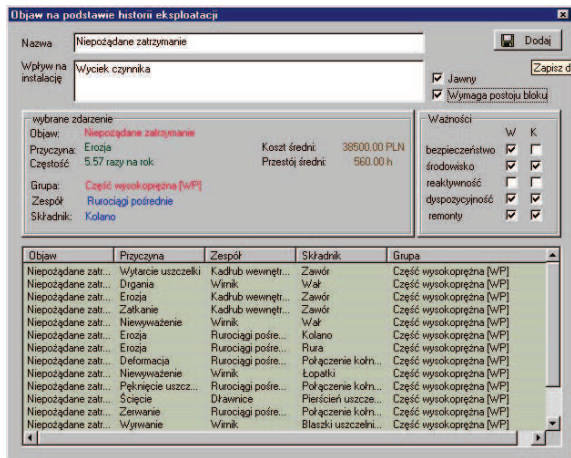
Przyczynę uznajemy za krytyczną wtedy gdy poziom ryzyka związanego z jej zaistnieniem jest większy od poziomu dopuszczalnego przez użytkownika. Poziomy krytyczne ryzyka określamy poprzez:

- zdefiniowanie maksymalnego dopuszczalnego kosztu związanego z sumą efektów od przyczyny w ciągu roku
- określenie maksymalnego dopuszczalnego przestoju bloku związanego z łącznymi przestojami bloku związanymi z rozpatrywaną przyczyną w ciągu roku
- w przypadku bezpieczeństwa, środowiska oraz reaktywności uznajemy za krytyczne wszystkie przyczyny dla których waga ustalona przez eksperta jest większa od wagi dopuszczalnej ustalonej przez użytkownika

Dla wszystkich przyczyn krytycznych należy określić skuteczne działania zmierzające do zmniejszenia poziomu ryzyka.

Dysponując sformułowanymi kryteriami oceny krytyczności przeprowadza się analizę istniejących (na podstawie historii eksploatacji), oraz przewidywanych usterek funkcjonalnych.

Dla usterek zaobserwowanych w trakcie eksploatacji systemu oprogramowanie wyznacza efektów uszkodzeń na podstawie zgromadzonych doświadczeń a także opinii eksperckiej (Rys.4).



Rys.4. Określenie usterek funkcjonalnych zaobserwowanych

Im dłuższy okres zbierania informacji tym większe możliwości statystycznej analizy danych i precyzyjnego określenia ryzyka jakie niosą uszkodzenia. Wskazując uszkodzenie znajdujące się w bazie danych otrzymuje się podstawowe statystyki takie jak obserwowana ilość usterek w roku, średni koszt wystąpienia usterki i średni przestój przez nią generowany. Są to informacje będące podstawą do podjęcia dalszych decyzji.

Program określa średnie efekty towarzyszące uszkodzeniu. Wyniki te zostają porównane z ustawionymi progami powodując wskazanie ważności i krytyczności w przyjętych kategoriach.

W wielu przypadkach, kiedy nie dysponuje się danymi o usterkowości, należy rozważyć przewidywane (lub bardzo prawdopodobne) usterki, to znaczy oszacować ich efekty, przyczyny i przewidywaną częstość występowania. Jedynym źródłem informacji są w takim przypadku operatorzy urządzenia, producenci lub inni użytkownicy. Gdy dla uszkodzenia zostaną przypisane efekty, przyczyna oraz zostanie ono umiejscowione w strukturze całego obiektu oprogramowanie wyznacza ważności i krytyczności przyczyn analogicznie jak dla uszkodzenia z historii eksploatacji. Przykładowe wyniki analizy przedstawiono na (rys.5).

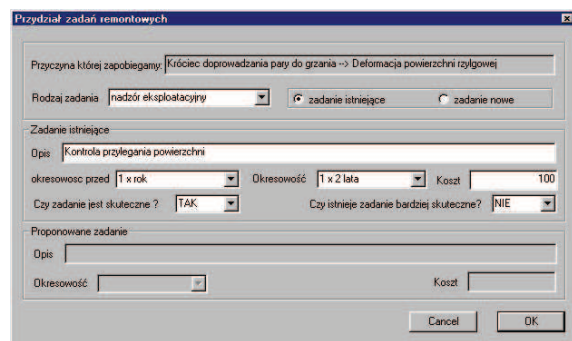
Kl.	Nazwa	Zespół techn.	Składnik	Przyczyna
1	Niepożądane zatrzymanie	Kadłub wewnętrzny	Zawór	Pęknięcie uszczelki
2	Wyciercie uszczelki	Wirnik	Blaszki uszczelki	Wyciercie uszczelki
3	Wyrwanie	Wirnik	Blaszki uszczelki	Wyrwanie
4	Korozyjny blęszk uszczelki	Wirnik	Blaszki uszczelki	Korozyjny blęszk uszczelki
5	Zerwanie bandażu	Wirnik	Bandaż	Zerwanie
6	Pęknięcie	Wirnik	Bandaż	Pęknięcie
7	Pęknięcie stopki	Wirnik	Łopalki	Pęknięcie

Rys.5. Wyniki analizy krytyczności

Dla części wysokoprężnej turbiny rozpoznano stu uszkodzeń różnych elementów, wśród których w wyniku przeprowadzonej analizy ryzyka ok. 30% uznano za krytyczne. Przykładowo pęknięcie

uszczelki zaworu w kadłubie wewnętrznym powodujące nie realizowanie podstawowej funkcji części wysokoprężnej w wyniku zatrzymania jej pracy, ze względu na poważne skutki ekonomiczne zostało uznane za uszkodzenie krytyczne dla systemu.

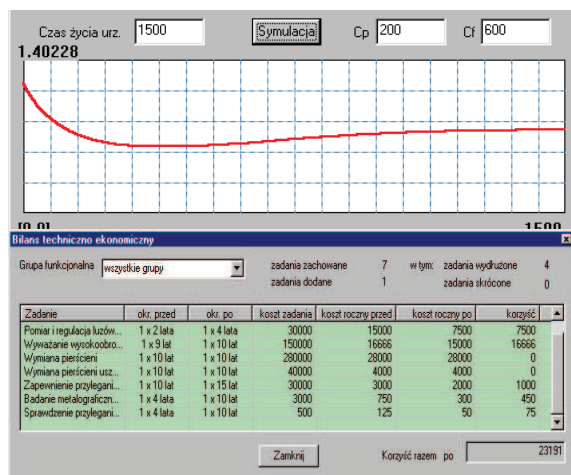
Ostatnim etapem analizy jest przydzielenie nowych oraz rewizja istniejących zadań eksploatacyjnych, tzn. zaproponowanie rodzaju działań, ich zdefiniowanie oraz propozycja zmiany lub zachowania ich okresowości. (rys.6). Zadania serwisowe są przydzielane dla każdej przyczyny rozpoznanej jako krytyczna. Zadania klasyfikowane są do trzech kategorii, nadzoru eksploatacyjnego, testów oraz działań zapobiegawczych. Najpierw określa się czy proponowane zadanie jest zadaniem istniejącym czy może jest zadaniem nowym. Algorytm przydziału zadań wymusza następnie na operatorze odpowiedź na pytanie czy zadanie jest skuteczne, to znaczy czy metoda zapobiegania jest właściwa, jeśli tak to prawdopodobnie należy zmienić jedynie okresowość działania. Jeśli zadanie nie jest skuteczne w opinii eksperta prowadzącego analizę to należy zaproponować nowe działanie (okresowość, metodę, koszt).



Rys.6. Przydział zadań serwisowych – przykład dla części WP turbiny

Dla działań zapobiegawczych, w przypadku gdy dysponujemy wystarczającą ilością danych aby przeprowadzić analizę statystyczną charakterystyk uszkodzeń, możemy spróbować wyznaczyć optymalne wartości planowych czasów wymian lub remontów, mając na uwadze kryterium minimalnego kosztu serwisowego w zakładanym okresie użytkowania lub maksymalnej dyspozycyjności w tymże okresie. Przykładowy przebieg krzywej kosztu w okresie czasu 1500 godzin pracy urządzenia pokazuje (Rys.7). Charakter krzywej pokazuje że przy koszcie całkowitym skutków awarii (Cf) oraz całkowitym koszcie prowadzenia wymiany zapobiegawczej (Cp) najkorzystniejszy czas wymiany prewencyjnej znajduje się w przedziale 300-600 godzin pracy. Krzywą wyznaczono w oparciu o dwuparametrowy rozkład Weibulla, po wcześniejszej estymacji jego parametrów.





Rys.7. Wyznaczenie czasu optymalnych wymian prewencyjnych

Wyniki analizy można przedstawić w postaci listy zmian dokonanych w planach serwisowych, obrazującej ilość zmian ich tendencje oraz bilans ekonomiczny ich wprowadzenia (rys.8).

Rys.8. Bilans techniczno ekonomiczny

Stosując przedstawione oprogramowanie można drogą badań symulacyjnych dokonać optymalizacji zadań eksploatacyjnych.

## 6. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione w pracy podejście oraz zbudowane narzędzie komputerowego wspomaganie procesów eksploatacji umożliwiają wybór najlepszej strategii serwisowania dla danego użytkownika, który musi zdefiniować kryteria zarówno co do kosztów jak również co do możliwego dla niego ryzyka nieprzewidzianej awarii.

Przedstawiona procedura oraz narzędzia ją realizujące mogą być wykorzystane dla dowolnego urządzenia bez względu na stopień jego złożoności oraz strukturę fizyczną. Należy również zaznaczyć, że przy analizach wykorzystując to oprogramowanie można symulować różne strategie serwisowe pod kątem kosztu realizacji jednocześnie wyznaczając ryzyko awarii. W ten sposób dokonuje się optymalizacji eksploatacji według przyjętego kryterium, które najczęściej jest definiowane jako minimum ryzyka oraz minimum kosztów serwisowania.

## 7. LITERATURA

- [1] Moubray J., Reliability – centered maintenance, Reed Educational and Professional Publishing Ltd., OXFORD, 1999.
- [2] Uhl T. Współczesne trendy rozwojowe systemów monitorowania i diagnozowania maszyn, PAK, no.4, 1999.
- [3] Pietrzyk A, Uhl T, Piskorz Z., Wykorzystanie technik RCM w projektowaniu systemów

monitorowania, XIV Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych Krynica 2001

- [4] Oziemski S. Efektywność eksploatacji maszyn – Podstawy techniczno ekonomiczne, Radom 1999, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji
- [5] Ayyub R., McCuen R., Probability, Statistics & Reliability for Engineers, New York 1997, CRC Press
- [6] Smalko Z, Analiza drzew niezawodności, zagrożeń i zabezpieczeń. Wykład – XXVII Szkoła niezawodności – Szczyrk 1999.
- [7] Józwiak I, Zastosowanie modelu hazardów proporcjonalnych Weibulla w badaniach niezawodności systemów technicznych Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1991.
- [8] Przyczyny i Skutki Uszkodzeń Obiektów Technicznych – XXIV Zimowa Szkoła Niezawodności Szczyrk 1996
- [9] John D. Campbell, The Reliability Handbook, Plant Engineering and Maintenance vol23, Issue 6, 2000
- [10] PN-EN-292-1-1994
- [11] IEC-300-3-9-1995 – „Analiza ryzyka systemów technicznych”



Mgr inż. **Adam Pietrzyk** wydz. Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

W swojej pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami ekonomiki eksploatacji oraz wykorzystaniem osiągnięć serwisu zorientowanego na

niezawodność dla potrzeb energetyki.



Prof. zw dr hab. inż. **Tadeusz Uhl**, Urodził się w Nowym Sączu w 1956 roku. Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Praca doktorską obronił w 1983 roku, tytuł profesora uzyskał w 1998 roku. Obecnie jest kierownikiem Katedry Robotyki i Dynamiki Maszyn

na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Autor ponad 300 publikacji w tym 14 podręczników monografii. Zajmuje się problematyką dynamiki strukturalnej, diagnostyki maszyn, identyfikacji modeli, mechatroniki, oraz konstrukcją systemów monitorowania.