

# WSPOMAGANIE PODEJMOWANIA DECYZJI REMONTOWYCH Z WYKORZYSTANIEM MODELU CBM

Lukasz DZIERŻANOWSKI, Michał TOMASZEWSKI

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono możliwości zastosowania modelu CBM dla wspomagania gospodarki remontowej wytwórcy energii elektrycznej. W szczególności omówiono metodologię zastosowaną dla opracowania danych diagnostycznych zasilających analizowany model CBM. Obiektem badań były powierzchnie ogrzewalne komory paleniskowej dużego kotła energetycznego.

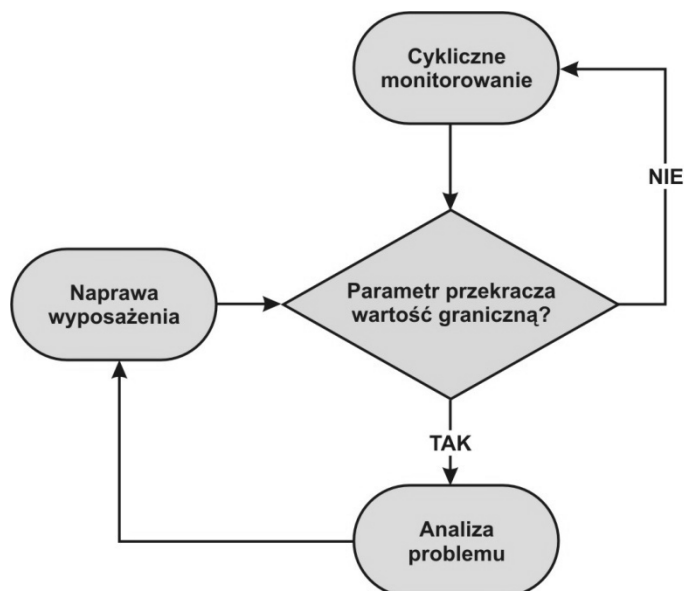
**Słowa kluczowe:** model CBM, remonty, dane diagnostyczne, podejmowanie decyzji remontowych.

## 1. Modelowanie procesu wykonywania remontów

Podejmowanie decyzji w zakresie gospodarki remontowej dotyczy często ustalenia optymalnego momentu wykonania remontu. Wykorzystuje się w tym celu stale rozwijane techniki diagnostyczne pozwalające z odpowiednią precyzją określić kondycję obiektów poddawanych procesom remontowym. System naprawialny, czyli taki, który ze stanu, w którym nie spełnia jednej lub wielu swoich funkcji, może zostać przywrócony do w pełni satysfakcjonującego funkcjonowania w sposób inny niż jego całkowita wymiana [1], zwykle poddawany jest remontom profilaktycznym (oznaczanym jako PM – ang. *Preventive Maintenance*), zazwyczaj w określonych interwałach czasowych – tzw. TBM (ang. *Time Based Maintenance*) lub bez planowania interwałów czasowych, a w oparciu o ujawniony przez inspekcję stan systemu – tzw. CBM (ang. *Condition Based Maintenance*).

Głównym założeniem modeli TBM jest teza, że ryzyko awarii zależy całkowicie od wieku urządzenia. Oznacza to, że dwa jednakowe komponenty w tym samym wieku, mają taką samą stopę ryzyka wystąpienia awarii, bez względu na zdarzenia, które miały miejsce w czasie ich wytwarzania czy pracy. Należy zauważyć, że jest to znaczne uproszczenie, gdyż w rzeczywistości nie ma dwóch identycznych detali – można wyróżnić wiele czynników, mających na to wpływ: wady ukryte, różnice w materiale, z którego zostały wykonane, dokładności obróbki, zanieczyszczenia, działania remontowe, czy różnego rodzaju zdarzenia zewnętrzne. Obecność uszkodzonych komponentów systemu może również mieć niszczący wpływ na pozostałe elementy. Z tego powodu trzeba stwierdzić, że postęp degradacji systemu jest zbiorem procesów zależnych także od wielu innych czynników – nie tylko od wieku.

CBM jest efektywną odmianą remontów prognozujących – bazuje ona na wczesnym wykrywaniu przyczyn lub symptomów awarii tak, by w sposób możliwie tani można było jej zapobiec. Działania remontowe w CBM przebiegają więc raczej na podstawie aktualnego stanu urządzenia, a nie czasu. Stan systemu przewidywany jest na podstawie trendu pomiarów parametrów fizycznych w odniesieniu do ustalonych dla nich norm w celu wykrycia, analizy i rozwiązywania problemów zanim się pojawią. Parametry te są mierzone cyklicznie (cotygodniowo, co dwa tygodnie, co miesiąc, itp.); w sytuacji, gdy mierzony parametr przekroczy wartość graniczną, musi on zostać poddany dalszej analizie.



Rys. 1. Tradycyjny cykl w CBM [2]

W tradycyjnym podejściu w CBM, decyzja sprowadza się do pełnej naprawy lub nie podejmowania żadnych działań, zakres działań może zostać jednak rozszerzony o inne zadania, np.:

- regulacja urządzenia,
- wymiana uszkodzonych elementów,
- wymiana elementów jednorazowych, takich jak powietrze, olej, filtry itp.,
- przeprowadzenie remontu kapitalnego, w celu doprowadzenia wyposażenia do stanu „jak nowy”.

## 2. Model CBM w analizie dostępności systemu

Amari i McLaughlin [2] przedstawiają rozwiązanie pozwalające na zbudowanie modelu CBM, wykorzystującego łańcuchy Markowa. Model ten został opisany zbiorem parametrów przedstawionych w tab. 1.

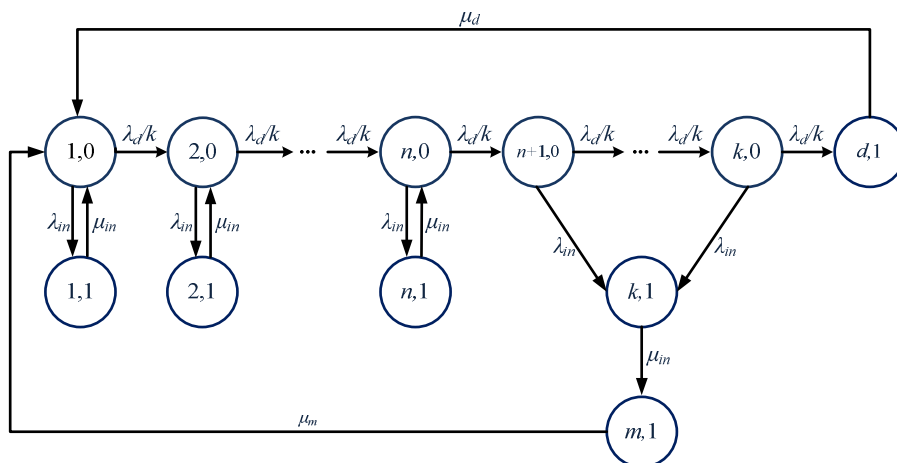
Tab. 1. Zbiór parametrów opisujących model CBM przedstawiony przez Amarię i McLaughlina

$i$	stan degradacji, $i = 1$ : „jak nowy” $i = k$ : przed stanem awarii degradacyjnej $i = n$ : próg remontu
$k$	ilość stanów degradacyjnych
$\lambda_d$	średni czas pomiędzy stanem „jak nowy” a awarią degradacyjną, jeśli nie podjęto działań remontowych;
$\lambda_{in}$	średni czas pomiędzy inspekcjami

$\mu_d$	średni czas trwania remontu naprawczego następującego po awarii degradacyjnej
$\mu_{in}$	średni czas inspekcji
$\mu_d$	średni czas remontu profilaktycznego
$S(i)$	stan $i$ w łańcuchu Markowa
$P(i)$	prawdopodobieństwo $S(i)$
$A$	dostępność systemu

System przedstawiony na rys. 3 może znajdować się w pięciu stanach:

1.  $S(i,0)$ : system pracuje w stanie  $i$ ,
2.  $S(i,1)$ : system podlega inspekcji w stanie  $i$ ,
3.  $S(k,1)$ : system podlega inspekcji po przekroczeniu progu remontu  $n$ .
4.  $S(d,1)$ : system uległ awarii w skutek degradacji, podlega remontowi naprawczemu
5.  $S(m,1)$ : system podlega remontowi profilaktycznemu



Rys. 2. Łańcuch Markowa w modelu CBM [2]

Prezentowane przez Amarię i McLaughlina metody pozwalają na znalezienie optymalnych parametrów modelu, zwiększających dostępność systemu  $A$ , definiowaną jako prawdopodobieństwo, że w określonym czasie  $t$  system będzie pracował.

Model może zostać rozwinięty o parametry ekonomiczne; wymaga to identyfikacji kosztów związanych z działaniami diagnostycznymi, kosztów remontowych oraz kosztów wynikających z wystąpienia awarii systemu. Pozwala to analizować różne warianty remontowe zarówno w świetle kryteriów technicznych, jak i poddać je ocenie ekonomicznej.

### 3. Zastosowanie modelu CBM w procesie diagnostyczno-remontowym ekranów kotła BP-1150

Na przestrzeni ostatniego roku autorzy prowadzili analizy z wykorzystaniem modelu CBM rozszerzonego o parametry ekonomiczne. Obiektem badań były powierzchnie

ogrzewalne komory paleniskowej dużego kotła energetycznego. Wybrano ekrany komory paleniskowej kotła, jako jeden z obszarów mający istotny wpływ na ogólną awaryjność bloku. Złożoność topologiczna oraz analiza historycznych danych remontowych tego obiektu pozwala sądzić, iż większość procesów związanych z diagnostyką, przetwarzaniem danych pomiarowych, identyfikacją obszarów mających podlegać wymianie, a także struktury kosztów remontu i analizą dostępności obiektu wymaga zintegrowanego i systemowego podejścia. Wsparcie komputerowe wydaje się szczególnie korzystne w obszarze przetwarzania danych pomiarowych w celu wyznaczenia obszaru remontu oraz wykorzystaniu modelu matematycznego w celu ustalenia najkorzystniejszej częstości inspekcji oraz wartości granicznej grubości rur, poniżej której należałoby przeprowadzić remont – zwanej progiem remontu ( $n$ ).

Dla potrzeb przeprowadzenia symulacji zaprojektowano środowisko komputerowe obejmujące następujące komponenty:

- MS Excel – arkusze kalkulacyjne: opracowanie i analiza danych diagnostycznych,
- LabView – program obliczający dostępność systemu  $A$ , dla wybranych wariantów remontowych,
- AutoCAD – wizualizacja danych diagnostycznych [4, 5],
- IFS Applications – zarządzanie procesem diagnostyczno-remonowym [6].

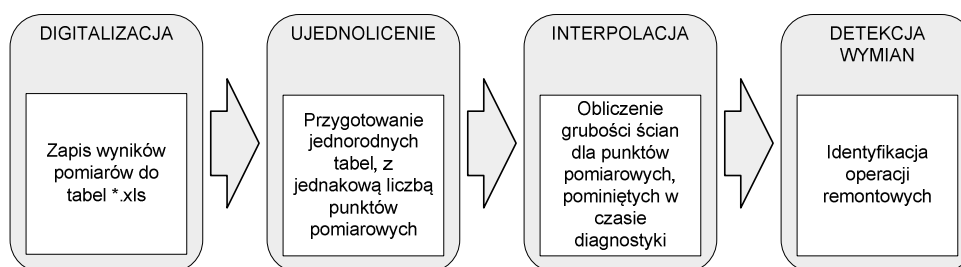
Przeprowadzenie analizy degradacji ekranu wymaga dostarczenia odpowiednich danych pomiarowych pozwalających na ustalenie kluczowych parametrów modelu CBM (grubości ścian rur  $g_{in}$  i czas degradacji  $\lambda_d$ , częstość inspekcji  $\lambda_{in}$ , średni czas trwania remontu profilaktycznego  $\mu_m$ , średni czas trwania remontu awaryjnego  $\mu_d$ , średni czas trwania inspekcji  $\mu_{in}$ ).

#### 4. Przygotowanie danych zasilających model

Zmieniająca się na przestrzeni lat metodologia wykonywania pomiarów oraz przeprowadzania działań remontowych w obszarze analizowanego kotła skutkowała m. in.:

- błędami w rejestrowaniu i digitalizacji wyników pomiarów.
- lukami informacyjnymi (wybiórczo prowadzona dokumentacja diagnostyczna i remontowa).

Dane źródłowe posiadały cechy, które nie pozwalały na bezpośrednie zasilenie modelu. Konieczne było więc wykonanie analizy i przetworzenie danych według schematu przedstawionego na rys. 3.



Rys. 3. Analiza i przetwarzanie danych pomiarowych

#### 4.1. Digitalizacja pomiarów

Po wykonaniu, pomiary zapisywano w tabelach, które następnie konwertowano do arkuszy kalkulacyjnych programu Excel. Ze względu na ilość danych, sięgającą na ogół kilku tysięcy, niezbędna jest digitalizacja danych w celu poddania ich późniejszej analizie. Jedynie zapis elektroniczny i komputerowe ich przetworzenie pozwala na analizę i formułowanie prawidłowych wniosków.

Obecnie coraz większą uwagę przykładają się do integracji systemu pomiarowego z diagnostycznymi bazami danych, w znacznej mierze automatyzuje to i przyspiesza prace oraz, co szczególnie istotne, pozwala uniknąć pomyłek, jakie powstają przy ręcznym rejestrowaniu i przepisywaniu wyników pomiarów.

#### 4.2. Ujednolicenie tabel

Praktyka pokazuje, że w kolejnych latach zapis ten jest niejednorodny – tabele mają różny format, często również zasilane są danymi pochodzącymi z pomiarów wykonanych w różnych miejscach.

Aby możliwe było przeprowadzenie badań, konieczne jest ujednolicenie tabel, polegające na zapewnieniu spójności zarówno co do ilości punktów pomiarowych jak ich lokalizacji (poziomu pomiaru, jak i numeru badanej rury).

#### 4.3. Interpolacja

Po przygotowaniu tabel, konieczne jest uzupełnienie luk informacyjnych, powstałych w wyniku zmian strategii diagnostycznych w kolejnych latach. Brakujące dane zostały uzupełnione za pomocą liniowej interpolacji wartości sąsiednich punktów.

#### 4.4. Rozpoznanie wymian

Kolejnym krokiem jest identyfikacja operacji remontowych. Potrzebna jest prognoza pozwalająca oszacować grubości ścian, gdyby nie było remontów. W sytuacji, gdy dokumentacja jest kompletna, jest to operacja prosta, nie wymagająca obliczeń, jednak także w tym przypadku, często problemem okazuje się być brak szczegółowej dokumentacji, wymuszający przeprowadzenie analizy porównawczej uwzględniającej niepewność pomiaru.

$$g_{i,j} - \varepsilon \geq g_{i,j-1} \quad (1)$$

gdzie:

$g_{i,j}$  – grubość ściany w punkcie  $i$  ujawniona w czasie inspekcji  $j$ ,

$\varepsilon$  – niepewność pomiaru

W badaniach przyjęto, że, jeżeli ten warunek jest spełniony, to po przeprowadzeniu  $j-1$ -tej inspekcji, w punkcie  $i$  została wykonana wymiana – grubość ściany ekranu po roku jest większa niż poprzednio, po odjęciu błędu pomiarowego. Jeśli ten warunek nie jest spełniony, przyjmuje się, że remontu nie było.

#### 4.5. Obliczenie gradientów degradacji

Identyfikacja wymian, pozwala na obliczenie degradacji ścian rur ekranu  $\Delta g_{i,j}$

(ujawnioną w czasie  $j$ -tej inspekcji) i degradacji średniej  $\Delta g_i$  w analizowanym okresie eksploatacyjnym  $t_e$ . Pozwala to na obliczenie gradientu degradacji ścian rur ekranu  $\nabla g_i$ .

Jeżeli przy poprzedniej inspekcji miała miejsce wymiana rur ekranu w punkcie  $i$ , wielkość tę obliczana jest następująco:

$$\Delta g_{i,j} = g_o - g_{i,j}, \quad (2)$$

gdzie:

$g_o$  – grubość obliczeniowa ściany rury ekranu

$g_{i,j}$  – grubość ściany rury ekranu

$i$  – punkt pomiarowy

$j$  – numer inspekcji

w przeciwnym wypadku:

$$\Delta g_{i,j} = g_{i,j} - g_{i,j-1}, \quad (3)$$

zatem

$$\nabla g_i = \frac{\sum_{j=0}^e \Delta g_{i,j}}{t_e}, \quad (4)$$

gdzie:

$\nabla g_{i,j}$  – gradient degradacji w punkcie  $i$

$t_e$  – czas eksploatacji

Dane te służą do obliczenia czasu degradacji  $\lambda_{di}$  ze stanu „jak nowy” do stanu  $k$ , dla każdego z punktów pomiarowych.

$k$  oznacza ilość możliwych stanów systemu, jest też indeksem stanu systemu w momencie, gdy może on ulec awarii degradacyjnej. Parametr  $k$  można wyznaczyć następująco:

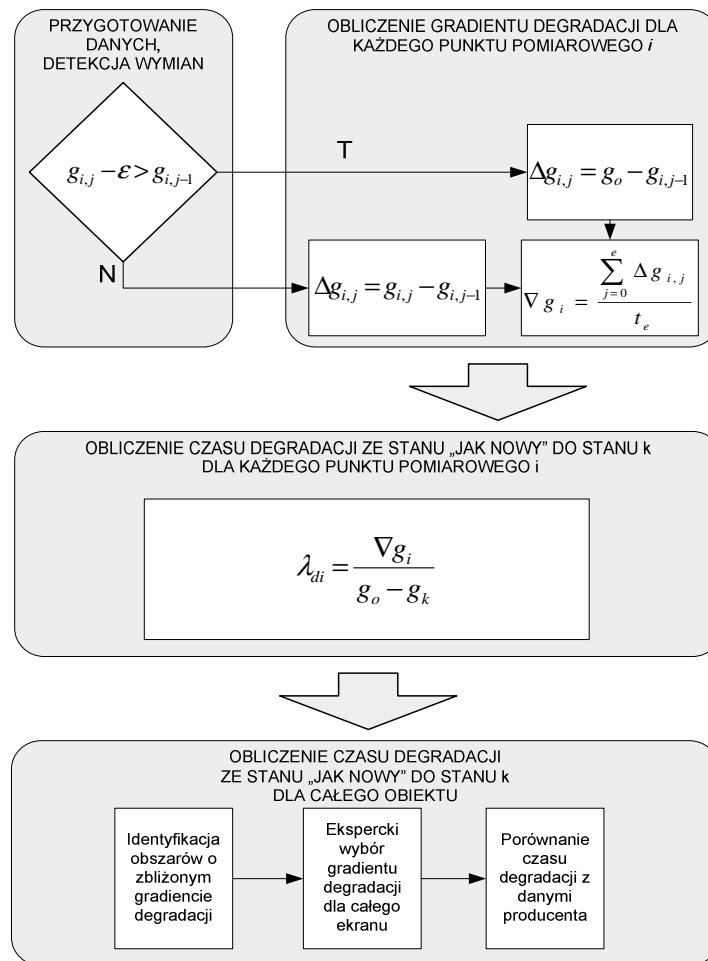
$$k = \frac{g_o - g_k}{\varepsilon} \quad (5)$$

Czas degradacji od stanu  $S(1)$ , kiedy  $g_i = g_o$ , do stanu  $S(k)$ , kiedy  $g_i = g_k$ , można wyrazić następująco:

$$\lambda_{di} = \frac{\nabla g_i}{g_o - g_k}, \quad (6)$$

Po wyznaczeniu tych parametrów dla wszystkich punktów ekranu, możliwa jest analiza całego obszaru ekranu, pod kątem rozkładu degradacji, mająca na celu wytypowanie obszarów o podobnych właściwościach, oraz wybór jednej wartości gradientu, który zostanie przyjęty dla obiektu.

Całość tych procedur została zilustrowana na rys. 4.



Rys. 4. Algorytm obliczania gradientów degradacji

## Podsumowanie

Przetworzenie źródłowych danych diagnostycznych pozwoliło na przeprowadzenie badań z wykorzystaniem zaprezentowanego modelu CBM. W ich wyniku:

- określono racjonalnie uzasadnione progi remontu  $n$ , dla których przy zadanych parametrach charakteryzujących harmonogram działań remontowych uzyskano najwyższe wartości dostępności systemu  $A$ ,
- przeprowadzono analizę zależności dostępności  $A$  od częstości inspekcji  $\lambda_{in}$ ; analiza ta była niezbędna dla przeprowadzonych później analiz ekonomicznych,
- przeprowadzono analizę ekonomiczną wybranych wariantów remontowych, w wyniku której uzyskano wartości poszczególnych kosztów składowych wpływających na koszt remontów profilaktycznych,
- wykazano liniową zależność pomiędzy czasem trwania inspekcji  $\mu_{in}$  a dostępnością

A i kosztem postoju, co potwierdza słuszność badań zmierzających do opracowania technologii pozwalającej na skrócenie czasu inspekcji. Określenie powyższych parametrów może usprawnić proces podejmowanie decyzji remontowych w obszarze komory paleniskowej badanego kotła energetycznego .

Wyniki prac pozwalają na postawienie tezy, że opracowanie nowych metod monitorowania stanu ścian rur ekranu w czasie rzeczywistym (skrócenie czasu wykonywania diagnostyki) pozwoli na:

- zniwelowanie kosztów wynikających z postoju i uruchomienia bloku po przeprowadzeniu inspekcji,
- wydłużenie czasu pracy systemu bez podejmowania czynności remontowych (zbliżenie progu remontu  $n$  do punktu  $k$ ) w czasie rzeczywistym.

Zaprezentowany model CBM może znaleźć zastosowanie w wielu obszarach gospodarki remontowej – zwłaszcza tam, gdzie szczególnie istotne jest wspomaganie decyzji dotyczących zaawansowanego harmonogramowania i ustalania progów remontu (energetyka). Zdaniem autorów możliwe i korzystne byłoby zastosowanie modelu dla potrzeb gospodarki remontowej innych obiektów elektroenergetycznych takich jak np. elektrownie wodne, elektrownie wiatrowe czy biogazownie.

## Literatura

1. Asher H., Feingold H.: Repairable systems – Modeling, interference, misconceptions and their causes. Marcel. Dekker. New York, 1984.
2. Amari S., McLaughlin L.: Optimal Design of a Condition-Based Maintenance Model. Reliability and Maintainability, Annual Symposium, RAMS, 2004.
3. Langseth H., Linquist B. H.: A maintenance model for components exposed to several failure mechanisms and imperfect repair. Mathematical and Statistical Methods in Reliability, 2002.
4. Dzierżanowski Ł., Tomaszewski M., Kwiatkowski L.: Techniki CAD w remontach kotłów, Mat. VII Konferencji Naukowo-Technicznej „Elektrownie ciepłne, Eksploatacja – Modernizacje – Remonty, Słok, 2005.
5. Dzierżanowski Ł., Tomaszewski M.: Matching the metrological databases of deterioration areas with the diagnostic data based on the OP-650 power boiler shields example, XIII Conference “Computer Applications in Electrical Engineering”, Poznań, 2008.
6. Dzierżanowski Ł., Tomaszewski M.: Komputerowo zintegrowana obsługa procesów remontowych w obszarze ekranów komory paleniskowej kotła OP650, Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie pod redakcją Ryszarda Knosali. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2008.

Mgr inż. Łukasz DZIERŻANOWSKI  
Dr inż. Michał TOMASZEWSKI  
Instytut Elektrowni i Systemów Pomiarowych  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Politechnika Opolska  
45 - 233 Opole, ul. K. Sosnkowskiego 31  
tel./fax.: (0-77) 400 6215  
e-mail: l.dzierzanowski@po.opole.pl  
m.tomaszewski@po.opole.pl