

Podsumowanie

Wykonane badania ujawniły główną przyczynę powstawania pęknięć wciągach zawieszonych wodooddzielacza, którą są drgania układu a w szczególności przemieszczenia belek układu mocującego. Wykonana analiza upoważnia do stwierdzenia, że opracowany model komputerowy umożliwia ocenę charakterystyk drgań w ujęciu ilościowym w odniesieniu do częstotliwości drgań oraz w ujęciu jakościowym w odniesieniu do wielkości i kierunków przemieszczeń. Można na jego podstawie wyciągnąć wnioski, co do wpływu cech konstrukcyjnych systemu mocowania separatora na możliwości powstawania pęknięć w elementach tego systemu. Przygotowanie takiego ujęcia na etapie projektowania może w takim przypadku stanowić podstawę w procesie weryfikacji i porównywania ze sobą różnych wersji rozwiązań konstrukcyjnych.

Wykonane obliczenia nie umożliwiły wprawdzie jeszcze w chwili obecnej ilościowej identyfikacji wymuszeń występujących w rozpatrywanym układzie. Zaproponowane ujęcie modelowe może jednak stanowić element w metodyce diagnozowania oddziaływań wymuszających drgania układu, bowiem umożliwia

wykonanie w krótkim czasie analizy wpływu różnorodnych oddziaływań na zachowanie się układu w ujęciu globalnym i lokalnym. Opracowany model w połączeniu z badaniami w warunkach eksploatacji takich parametrów jak lokalne zmiany ciśnienia i natężenia przepływu medium mógłby być wykorzystany również do określenia przyczyn drgań w ujęciu ilościowym i jakościowym.

Na obecnym etapie możliwe jest ograniczenie szkodliwego oddziaływania drgań rozpatrywanego urządzenia poprzez nieskomplikowane zmiany jego cech konstrukcyjnych. Celowe wydaje się kontynuowanie pracy w odniesieniu do charakterystyk wymuszeń dynamicznych, określenia wpływu drgań na zjawiska zmęczeniowe i procesy pęknięcia materiałów pracujących w urządzeniach energetycznych oraz metod zapobiegania wibracjom i ograniczania oddziaływań o zmęczeniowym charakterze.

Publikacja opracowana na podstawie wyników badań w ramach projektu badawczego N 507 514839



Andrzej Rusin, Adam Wojaczek, Michał Bieniek
Politechnika Śląska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Wybrane zagadnienia oceny trwałości i wspomagania decyzji remontowych elementów bloków energetycznych o długim czasie eksploatacji

Selected aspects of the assessment of life and of supporting decisions concerning overhaul of power unit components with a long operating life

Teoretyczne oceny trwałości elementów turbiny

Wydłużanie czasu eksploatacji maszyn i urządzeń energetycznych poza okres projektowany wymaga przeprowadzenia szerokich analiz bezpieczeństwa. Do tego celu wykorzystuje się zarówno analizy teoretyczne jak i badania nieniszczące i niszczące materiałów, z których wykonano elementy bloku. Stosując analizy teoretyczne należy przede wszystkim określić procesy prowadzące do zużycia, a następnie zniszczenia danego elementu. W przypadku głównych elementów turbiny tzn. wirników, kadłubów i zaworów należy zatem rozpatrzyć zużycie spowodowane procesami zmęczenia niskocyklicznego i pełzania. Zmęczenie niskocykliczne powodowane zmiennością obciążeń danego elementu występuje przede wszystkim w nieustalonych fazach pracy tzn. w czasie nagrzewania elementu przy uruchamianiu, chłodzeniu elementu przy odstawia-

niu, a także przy zmianach mocy oraz innych zakłóceniach pracy bloku objawiających się zmianą parametrów czynnika roboczego. Pełzanie dominuje w ustalonych warunkach pracy elementu. W obu wyżej wymienionych procesach ocena teoretyczna stopnia zużycia wymaga dokładnego określenia stanu naprężenia i odkształcenia występującego w najbardziej wyczerpanych obszarach danego elementu. Stan ten determinowany jest przez obciążenia mechaniczne (tzn. obciążenia powierzchniowe powodowane ciśnieniem pary i obciążenia masowe związane z wirowaniem elementów) oraz obciążenia termiczne spowodowane zmienną temperaturą czynnika roboczego. W literaturze istnieje wiele prostych jak i bardziej złożonych modeli pozwalających na wykonanie obliczeń stanu naprężenia w elementach. Szczególnie rozpowszechnione jest stosowanie metody elementów skończonych pozwalającej na modelowanie zarówno stanów termicznych jak i wytrzymałościowych. Jakość uzyskanych wyników, a tym samym i jakość oszacowania stopnia

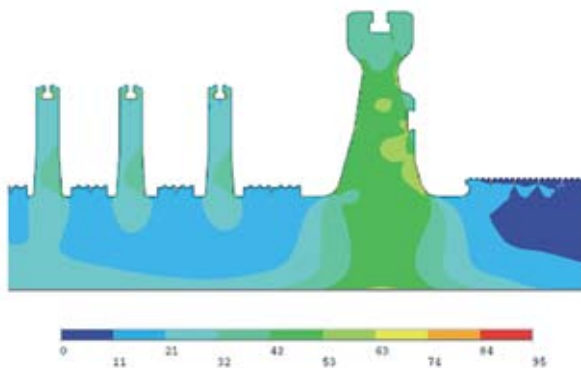
zużycia danego elementu uzależniona jest od precyzji określenia szeregu czynników, do których należy zaliczyć m.in.:

- model geometryczny elementu,
- model fizyczny materiału,
- mechaniczne i termiczne warunki brzegowe,
- dokładność odwzorowania rzeczywistego obciążenia elementu.

Model geometryczny powinien opisywać rzeczywiste kształty i wymiary danego elementu, co wymaga wykonania pomiarów na obiekcie rzeczywistym. Dotyczy to przede wszystkim grubości ścianek elementów ciśnieniowych, ale także średnic i kształtów potencjalnych miejsc koncentracji naprężeń np. rowków cieplnych w wirnikach.

Model fizyczny powinien opisywać nie tylko sprężyste, ale i sprężysto-plastyczne zachowanie się materiału, co jest szczególnie istotne przy określaniu zakresu zmian odkształcenia całkowitego w cyklu pracy elementu. Dość powszechnym błędem jest wykorzystywanie obliczeń naprężeń w stanie sprężystym do oceny zużycia spowodowanego pełzaniem. W tym przypadku konieczne jest modelowanie stanu naprężenia przy wykorzystaniu związków konstytutywnych opisujących zachowanie się materiału w warunkach pełzania.

Przykładowy rozkład naprężeń we fragmencie wirnika w stanie pełzania ustalonego pokazano na rysunku 1. W ustalonym stanie sprężystym naprężenia maksymalne były wyższe o kilkanaście MPa co będzie miało istotny wpływ na oszacowanie trwałości pełzaniowej tego wirnika.



Rys. 1. Rozkład naprężeń zredukowanych w wirniku wysokoprężnym turbiny w stanie pełzania ustalonego

Dominujący udział w stanie naprężenia w nieustalonych fazach pracy mają naprężenia termiczne. Są one bardzo trudne do oszacowania przede wszystkim ze względu na trudności w prawidłowym określeniu termicznych warunków brzegowych oraz ich zmiany w czasie. W praktyce najczęściej wykorzystuje się trzeci warunek brzegowy wymagający określenia:

- temperatury czynnika omywającego dany obszar elementu,
- współczynnika wnikania ciepła w danym obszarze.

Temperaturę czynnika uzyskuje się za pomocą modelowania przepływu pary przez stopnie turbinowe. Wykorzystuje się tutaj zarówno modele jednowymiarowe bazujące na równaniach przelotowości lub równania zachowania dla wieńców łopatkowych. Możliwe jest również pełne modelowanie ekspansji pary w stopniach przy wykorzystaniu metod numerycznych.

Drugi element konieczny do sprecyzowania termicznych warunków brzegowych tzn. współczynnik wnikania ciepła określa się na podstawie zależności kryterialnych o ogólnej postaci:

$$Nu = c \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (1)$$

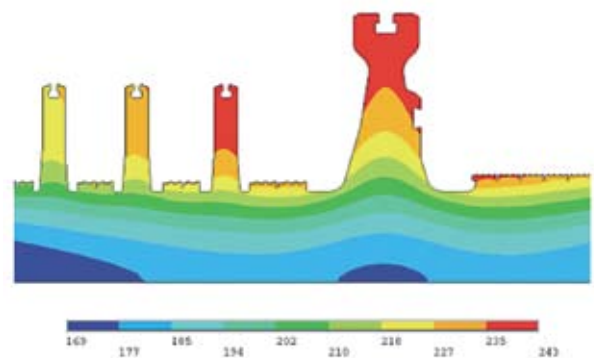
gdzie:

Nu, Re, Pr – liczby kryterialne odpowiednio Nuselta, Reynoldsa i Prandtla

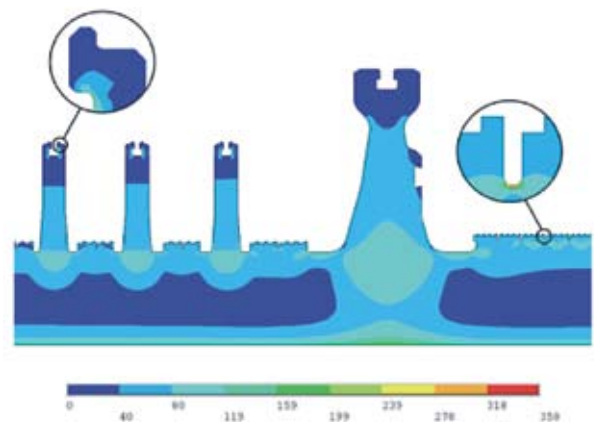
c, m, n – stałe.

Szczegółowe postacie takich zależności dla różnych powierzchni zaworów, wirników, kadłubów różnych typów turbin opracowano na podstawie wieloletnich badań doświadczalnych i eksperymentów numerycznych. Stworzona w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych biblioteka procedur obliczania współczynników wnikania ciepła pozwala na dokładne modelowanie warunków wymiany ciepła, a tym samym i rozkładów temperatury oraz naprężeń termicznych w elementach zwłaszcza w nieustalonych fazach pracy [2]. Przykładowy rozkład temperatury oraz naprężeń zredukowanych w czasie nagrzewania wirnika turbiny przy rozruchu ze stanu zimnego pokazano na rysunkach 2 i 3.

Zamodelowanie pełnego cyklu pracy danego elementu tzn. od chwili uruchomienia turbiny do jej odstawienia pozwala obliczyć składowe stanu naprężeń, składowe stanu odkształceń oraz amplitudy tych wielkości. To z kolei jest podstawą oszacowania zużycia spowodowanego takim cyklem pracy. Nowsze wersje takich analiz pozwalają uwzględnić niezdeterminowany charakter niektórych wielkości wpływających na trwałość. W takich przypadkach określane jest prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu w funkcji czasu jego eksploatacji [3,4,5].



Rys. 2. Rozkład temperatury w wirniku wysokoprężnym turbiny w 42 min rozruchu ze stanu zimnego



Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych w wirniku wysokoprężnym turbiny w 42 min rozruchu ze stanu zimnego

Bardzo ważnym elementem tych analiz jest ocena zachowania się potencjalnych lub rzeczywistych pęknięć i nieciągłości w materiale. Do przeprowadzenia prognozy zachowania się pęknięcia niezbędna jest znajomość geometrii elementu, właściwości materiału, rozmiarów i położenia wady oraz obciążeń działających na element.

Ponieważ dane niezbędne do przeprowadzenia oceny wady mają charakter losowy w analizie wykorzystać należy metody probabilistyczne.

Równaniem opisującym szybkość propagacji pęknięcia spowodowaną procesami zmęczeniowymi jest równanie Parisa-Erdogana:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_f = C(\Delta K)^n \quad (2)$$

gdzie:

ΔK – zmiana wartości współczynnika intensywności naprężeń w trakcie cyklu pracy,

C, n – stałe materiałowe.

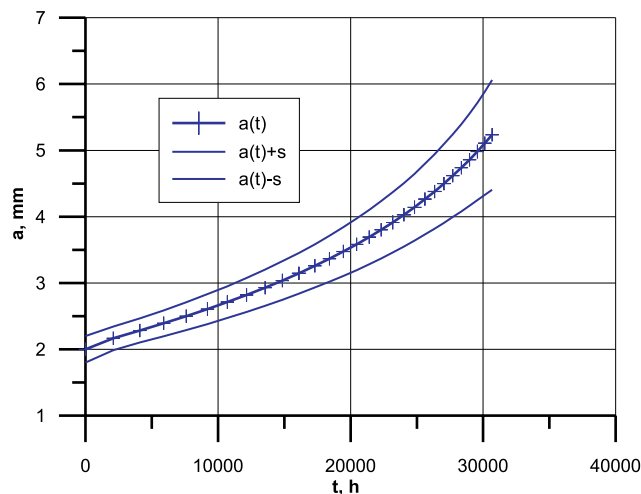
Szybkość propagacji pęknięcia spowodowaną procesem pełzania opisuje równanie:

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_c = C_2(C^*)^q \quad (3)$$

gdzie C_2 i q – to stałe materiałowe, a parametr C^* to szybkość zmiany całki J , który określa szybkość zmiany energii w obrębie pęknięcia.

Stosując zasadę liniowego sumowania uszkodzeń, w przypadku występowania zarówno pełzania i zmęczenia, całkowity przyrost pęknięcia w cyklu pracy elementu oblicza się sumując przyrost pęknięcia wywołanego procesem pełzania i procesem zmęczenia.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki przykładowej predykcji wzrostu osiowego pęknięcia wewnętrznego o głębokości początkowej $a_0 = 2$ mm znajdującego się w ścianie rurociągu o średnicy zewnętrznej $d_z = 457$ mm i grubości ścianki $g = 45$ mm pracującego w warunkach pełzania i zmęczenia. W analizie uwzględniano losowy charakter wielkości wejściowych a wyniki są przedstawiane jako wartość średnia wraz z odchyleniem standardowym, co może stanowić punkt wyjścia do analizy ryzyka.

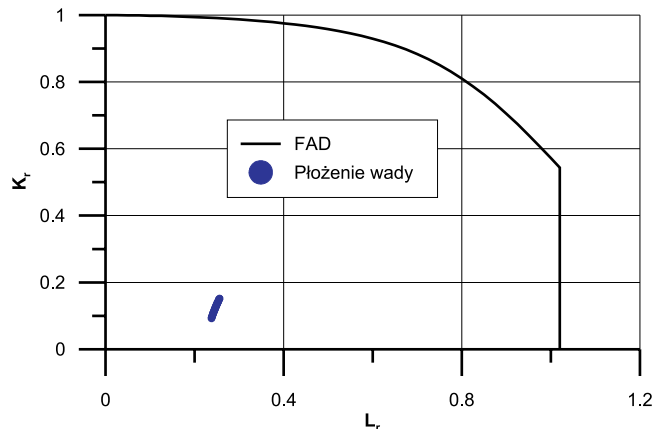


Rys. 4. Propagacja pęknięcia z uwzględnionym odchyleniem standardowym

Ocenę zagrożenia zniszczeniem przeprowadza się za pomocą diagramu zniszczenia opisanego w [6,7]. Krzywa graniczna FAD na diagramie zniszczenia oddziela obszar bezpieczny od niebezpiecznego uwzględniając dwa kryteria – $K_r = \frac{K_t}{K_{tc}}$ związany z kruchym pękaniem i $L_r = \frac{\sigma_{ref}}{R_c}$ odpowiadający za zniszczenie plastyczne elementu. Uniwersalna krzywa FAD opisana jest zależnością [7]:

$$K_r = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)] \quad (4)$$

Przykładowy diagram zniszczenia pokazano na rysunku 5. Znaczony punkt opisuje aktualny stan analizowanej powyżej wady.



Rys. 5. Położenie wady na diagramie zniszczenia

Optymalizacja okresów obsługi prewencyjnych

Bardzo istotnym działaniem zapewniającym bezpieczeństwo eksploatacji maszyn i urządzeń energetycznych jest odpowiedni zakres i okres przeprowadzenia różnego rodzaju obsługi prewencyjnych w tym remontów.

Podstawowym celem tych działań jest niwelacja negatywnych efektów różnych procesów zużycia pogarszających stan techniczny obiektów i przywrócenie ich do takiego poziomu, aby mogły bezpiecznie pracować do czasu kolejnej odnowy nie ulegając w tym okresie uszkodzeniu. Często w praktyce przemysłowej wykonuje się te działania w regularnych okresach czasu ustalanych na podstawie doświadczeń i praktyki eksploatacyjnej. Często wykorzystuje się wiedzę uzyskaną z badań diagnostycznych i systemów monitoringu eksploatacji. Brane są pod uwagę zarówno koszty działań obsługowo – remontowych jak i poziomu bezpieczeństwa eksploatacji danego urządzenia. Miarą tego bezpieczeństwa jest poziom ryzyka technicznego stwarzanego przez dany obiekt. Przez ryzyko techniczne rozumie się iloczyn prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia niepomyślnego (tzn. uszkodzenia danego obiektu) oraz jego konsekwencji [6]. Oznaczając ryzyko jako R zapiszemy:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i C_i \quad (5)$$

gdzie:

P_i – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia „i”,

C_i – konsekwencje zajścia zdarzenia „i”,

n – liczba zdarzeń niebezpiecznych związanych z danym obiektem.

Ryzyko to może być podstawą definiowania kryteriów optymalizacji okresów jak i zakresów [8] odnów prewencyjnych. Podstawą do obliczeń prawdopodobieństwa zdarzeń niekorzystnych są dane o eksploatacji obiektu, w tym przede wszystkim dane o awariach i uszkodzeniach elementów. Nieodzowna jest również znajomość procesów zużycia, które mogą prowadzić do uszkodzeń elementów. Drugi z czynników decydujących o poziomie ryzyka, czyli konsekwencje awarii i uszkodzeń wyrażane są najczęściej w jednostkach monetarnych. Prawidłowe ich ustalenie również wymaga dogłębnej znajomości warunków eksploatacji, remontów, a także zagadnień ekonomicznych danego przedsiębiorstwa. Jeżeli konsekwencje wyrażone zostaną w jednostkach monetarnych, to również ryzyko opisane powyższą zależnością ma ten wymiar. Staje się ono kategorią ekonomiczną i może być uwzględniane w rachunku ekonomicznym.

Monitoring tak zdefiniowanego ryzyka bloków energetycznych może być wspomagany za pomocą programów komputerowych np. [5] służący do ilościowej oceny ryzyka technicznego stwarzanego przez główne elementy bloku tzn. kocioł i turbinę. System ten składa się z czterech zasadniczych elementów: bazy danych, modułów obliczeniowych, wyjść graficznych oraz interfejsu użytkownika.

Podstawową bazą danych systemu jest baza danych o elementach stanowiących strukturę bloku energetycznego.

W skład bazy elementów wchodzi dane charakteryzujące zarówno konstrukcję jak i eksploatację elementu. Są to m.in.: dane o postaci geometrycznej i wymiarach elementu, dane materiałowe, dane eksploatacyjne zawierają informacje o obciążeniach eksploatacyjnych elementów, a także czasie pracy, liczbie uruchomień itp.

Drugim ważnym elementem struktury programu są moduły obliczeniowe. Ich zadaniem jest wykonanie obliczeń zgodnie z opracowanymi algorytmami. Są to m.in. modele procesów: zmęczenia, pęcznienia, erozyjnych rur kotłowych, propagacji pęknięć w grubościennych elementach kotła i turbiny, itd.

Kolejny moduł obliczeniowy – moduł analiz probabilistycznych – pozwala wykonać obliczenia prawdopodobieństwa uszkodzenia danego elementu według scenariuszy opisanych wspomnianymi wcześniej procesami. Ostatnim modułem obliczeniowym jest moduł realizujący obliczenia ryzyk związanych z danym elementem. Zidentyfikowane ryzyka związane z aktualnym stanem technicznym eksploatowanych bloków energetycznych mogą być podstawą racjonalizacji gospodarki diagnostyczno-remontowej.

Procedurę planowania gospodarki obsługowo – remontowej możemy zatem przedstawić jako procedurę optymalizacji jednostkowych kosztów całkowitych \bar{K}_c . Odnosząc koszty do czasu eksploatacji t otrzymamy koszt jednostkowy przypadający na jednostkę czasu:

$$\bar{K}_c = \frac{K_r + R}{t} = \bar{K}_r + \bar{R} \quad (6)$$

gdzie:

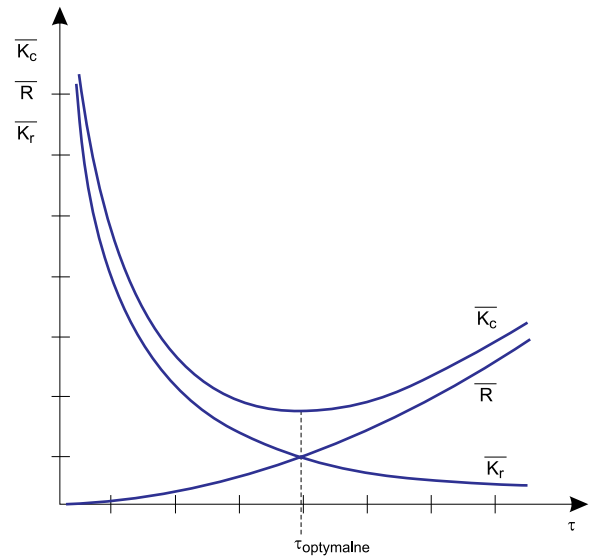
K_r – oznacza sumaryczne koszty poniesione na obsługę i remonty danego obiektu

R – całkowite ryzyko stwarzane przez dany obiekt

\bar{K}_c , \bar{K}_r , \bar{R} są wielkościami odniesionymi do jednostki czasu eksploatacji.

Optymalną wartość czasu trwania okresu międzyremontowego otrzymamy przez minimalizację funkcji celu, którą w tym

przypadku jest koszt całkowity \bar{K}_c co graficznie przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Dobór optymalnego czasu obsługi prewencyjnych

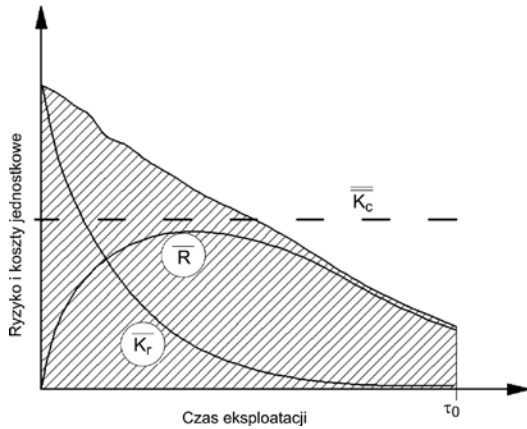
Sytuacja komplikuje się bardziej w przypadku obiektów złożonych stanowiących system, dla których prawdopodobieństwo ich uszkodzenia zależne jest od stanu poszczególnych elementów. Dokonywanie obsługi elementów takiego systemu może w różny sposób wpływać na stan całego systemu. Biorąc równocześnie pod uwagę fakt, że koszty przeprowadzenia obsługi dla każdego z elementów może być inny to efekt poprawy parametrów niezawodnościowych i obniżki ryzyka całego systemu można uzyskać za pomocą różnych nakładów finansowych. W analizie złożonych systemów wykorzystanie procedury zobrazonej na rysunku 6 jest niemożliwe z uwagi na częsty brak minimum krzywej. Traktując dalej procedurę planowania gospodarki diagnostyczno-remontowej jako procedurę optymalizacji kosztów zapiszemy ją obecnie nieco inaczej. Zakładamy, że planowany horyzont eksploatacji danego systemu wynosi τ_o . W czasie tego okresu przewidziane jest przeprowadzenie obsługi prewencyjnych poszczególnych elementów tak aby zapewniały one obniżanie ryzyka stwarzanego przez cały system. Częstsze obsługi prewencyjne będą powodować znaczące obniżanie ryzyka ale równocześnie będą podnosić koszty eksploatacji. Funkcją celu zdefiniujemy teraz jako minimalizację średniego jednostkowego kosztu całkowitego w całym rozpatrywanym okresie eksploatacji

$$\bar{K}_c(0; \tau_o) = \bar{K}_r(0; \tau_o) + \bar{R}(0; \tau_o) \quad (7)$$

Powyższe kryterium możemy zapisać:

$$\bar{K}_c = \frac{1}{\tau_o} \int_0^{\tau_o} \bar{K}_c(0; \tau_o) d\tau \quad (8)$$

Celem optymalizacji w tym przypadku jest minimalizacja uśrednionego jednostkowego kosztu całkowitego \bar{K}_c , a zmiennymi decyzyjnymi są okresy międzyremontowe obiektów tworzących system. Przedstawione kryterium optymalizacji przedstawiono graficznie na rysunku 7.



Rys. 7. Kryterium optymalizacji okresów obsługi przewencyjnych dla złożonych systemów

Powszechną zasadą jest wykorzystywanie diagnostyki przy wspomaganii decyzji remontowych. Wiele obiektów technicznych posiada zasób parametrów eksploatacyjnych które są silnie skorelowane z szeroko pojętym stanem technicznym i podczas eksploatacji zauważyć można ich zmianę. Metody CBM polegają na monitorowaniu zmian wybranej mierzalnej wielkości zwanej diagnostycznym symptomem stanu i wykorzystaniu tego sygnału do podejmowania decyzji remontowych [9].

Zaletą tego podejścia jest fakt, iż wykorzystuje zarówno informacje pochodzące z historii eksploatacji (awarie, remonty, inspekcje), jak i aktualny stan techniczny reprezentowany przez mierzalne symptomy stanu technicznego. Informacja o stanie technicznym najczęściej jest przekazana jako wektor zmiennych które reprezentują konkretne pomiary. Wektor ten należy po obróbce matematycznej dołączyć do tradycyjnej postaci funkcji intensywności uszkodzeń danego obiektu. Połączenie to w niezawodności maszyn zwane jako Proporcjonalny Model Zagrożeń (PHM) zostało zapoczątkowane przez Cox'a. Najczęściej wykorzystuje się standardową postać funkcji intensywności uszkodzeń dla rozkładu Weibull'a uzupełnioną przez wektor zmiennych opisujących stan techniczny. Ogólną zależność przedstawia

$$h(t, Z(t)) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left\{\sum_{i=1}^n \gamma_i Z_i(t)\right\} \quad (9)$$

gdzie:

α, β – parametry rozkładu Weibull'a

Pierwszy człon powyższej zależności $\beta/\alpha t(t/\alpha)^{\beta-1}$ przedstawia standardową postać funkcji intensywności uszkodzeń dla rozkładu Weibull'a i uwzględnia tylko wiek obiektu. Drugi człon $\exp(\gamma_1 Z_1(t) + \dots + \gamma_n Z_n(t))$ określa wpływ pomiarów diagnostycznych opisujących stan techniczny obiektu. Model ten umożliwia przeprowadzenie działań obsługowych zarówno dla wyznaczonej długości okresu eksploatacji jak i dla momentów w których zmienne diagnostyczne osiągają predefiniowane progi alarmowe. Tak zdefiniowana funkcja intensywności uszkodzeń pozwala obliczyć inne wskaźniki niezawodności w tym prawdopodobieństwo uszkodzenia się obiektu. Łącząc tą metodę z strukturą kosztów napraw przewencyjnych i poawaryjnych możliwa jest optymalizacja okresów międzyremontowych z uwagi na kryterium minimalizacji jednostkowych kosztów całkowitych.

Realia techniczne i ekonomiczne energetyki krajowej wskazują, że wiele bloków energetycznych będzie musiało być eksploatowanych przez okres znacznie przekraczający 300 tys. godzin. Rodzi to konieczność prowadzenia ścisłego nadzoru nad eksploatacją takich bloków oraz precyzyjnego określania ich stanu technicznego. Zasygnalizowano w artykule problemy dotyczące oceny stopnia zużycia głównych elementów bloku energetycznego jak i planowania remontów mogą uwzględniać ocenę ryzyka technicznego i są próbą kompleksowego nadzoru nad bezpieczeństwem elementów bloku. Informacje uzyskiwane za pomocą monitorowania poziomu ryzyka związanego z eksploatacją pozwalają podjąć racjonalnych działań obniżających to ryzyko. Należą do nich przede wszystkim działania obsługowe, badania diagnostyczne, remonty, a także optymalizacja warunków eksploatacji.

Przedstawione w artykule wyniki zostały częściowo uzyskane w badaniach współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin.

LITERATURA

- [1] Kosman G., Chmielniak T., Rusin A.: Computer aided lifetime evaluation and its application to turbines design and their operation. *ASME Paper* nr 93-GT-277, 1993, str. 1÷8.
- [2] Łukowicz H.: Zadania analizy w obliczeniach przepływowych turbin parowych w zastosowaniu dla diagnostyki i projektowania. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, nr 1699, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
- [3] Rusin A.: Assessment of operational risk of steam turbine valves, *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, vol. 81, nr 4, 2004, str. 373÷379
- [4] Rusin A.: Technical risk involved in long-term operation of steam turbines, *Reliability Engineering and System Safety* 92, 2007, str. 1242÷1249
- [5] Rusin A., Wojaczek A.: Computer-aided risk analysis of power units, *Journal of KONBIN*, nr 2, 2010, str. 163÷172
- [6] Rusin A.: Awaryjność, niezawodność i ryzyko techniczne w energetyce cieplnej, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008
- [7] BS 7910:2005 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
- [8] Rusin A., Wojaczek A. „Optymalizacja okresów międzyremontowych maszyn energetycznych z uwzględnieniem ryzyka” „Optimization of power machines maintenance intervals taking the risk into consideration” *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability – Vol.14, No.1, 2012 str.72-76*
- [9] Zhigang Tian, Haitao Liao, „Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model.” *Reliability Engineering and System Safety* 96 (2011) 581-589

