

prof. dr hab. inż. Andrzej Rusin, dr inż. Adam Wojacek, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska

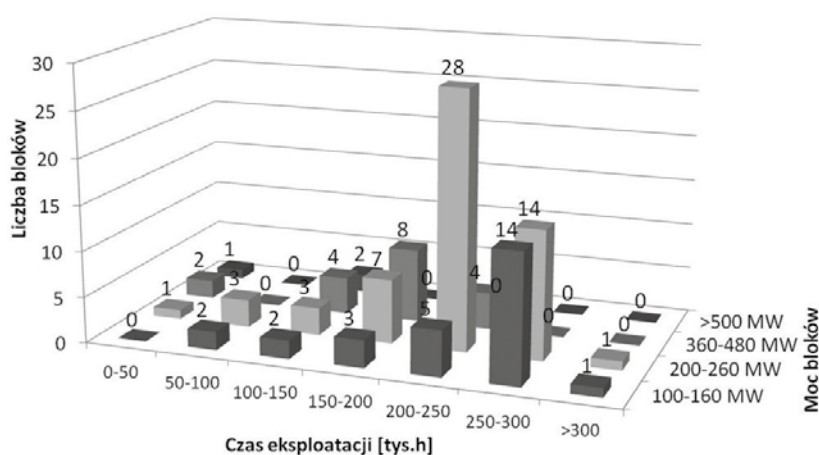
# ANALIZA RYZYKA

## jako narzędzie wspomaganie decyzji remontowych w energetyce

Nadrzędnym celem systemu elektroenergetycznego jest zapewnienie wszystkim odbiorcom ciągłości przesyłania energii elektrycznej o właściwych parametrach. Aby sprostać tym wymogom, niezawodność bloków energetycznych, która ma kluczowe znaczenie dla niezawodności całego systemu, musi być na odpowiednio wysokim poziomie. Właściwa gospodarka remontowa umożliwi utrzymanie wysokiej niezawodności przy wykorzystaniu między innymi metod analizy ryzyka. W artykule zasygnalizowano możliwości wykorzystania analizy ryzyka w planowaniu remontów w energetyce.

Działania w zakresie bezpieczeństwa sektora elektroenergetycznego poza zapewnieniem ciągłości dostaw surowców, głównie paliwa, sprządzają się do odbudowy zużytych mocy wytwórczych przez stawianie nowych bloków oraz dbałości o właściwą kondycję obecnie użytkowanych maszyn i urządzeń energetycznych. Polska energetyka dopiero od niedawna zaczęła odtwarzać swoje moce wytwórcze przez budowanie nowych bloków energetycznych. W ostatnich sześciu latach uruchomiono trzy nowe bloki węglowe na parametry nadkrytyczne, ale równocześnie wiele z obecnie jeszcze eksploatowanych bloków przekroczyło lub niebawem przekroczy 300 tys. godzin pracy (rys. 1.).

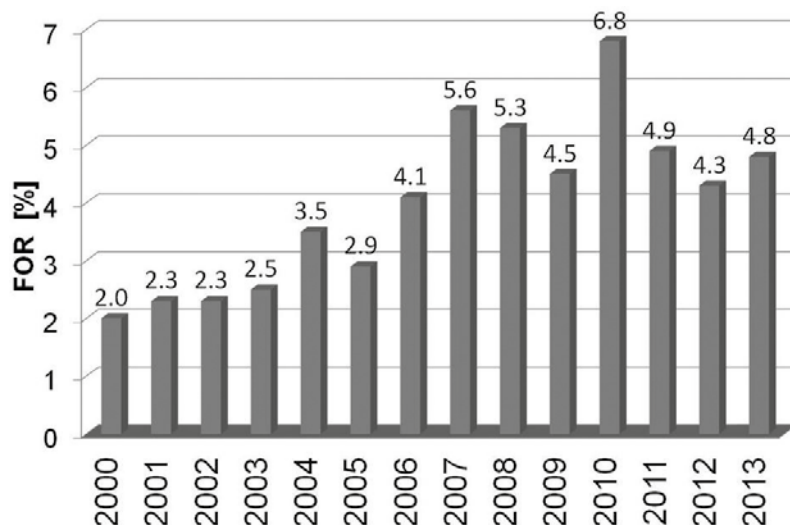
Bloki te charakteryzują się zwiększoną awaryjnością (rys. 2), a także większą liczbą nieplanowanych, czyli kosztownych, postojów. Takiej sytuacji



Rys. 1. Wiek krajowych bloków energetycznych na koniec 2013 r.

można przeciwdziałać przez zaplanowane obsługi profilaktyczne, a moment ich przeprowadzenia podlega optymalizacji względem kosztów. Częste remonty podwyższają koszt eksploatacji,

natomiast rzadkie podwyższają ryzyko techniczne wystąpienia poważnej awarii. Dobór właściwego okresu międzyremontowego oraz zakresu działań jest bardzo skomplikowany, szczególnie



Rys. 2. Zmienność wskaźnika awaryjności FOR w latach 2000-2013

wtedy, gdy główną przyczyną awarii są procesy zużycia (rys. 3). Właściwa polityka remontowa powinna pozwalać na poprawienie lub co najmniej utrzymanie wskaźników niezawodnościowych na akceptowalnym poziomie.

### Strategie remontowe

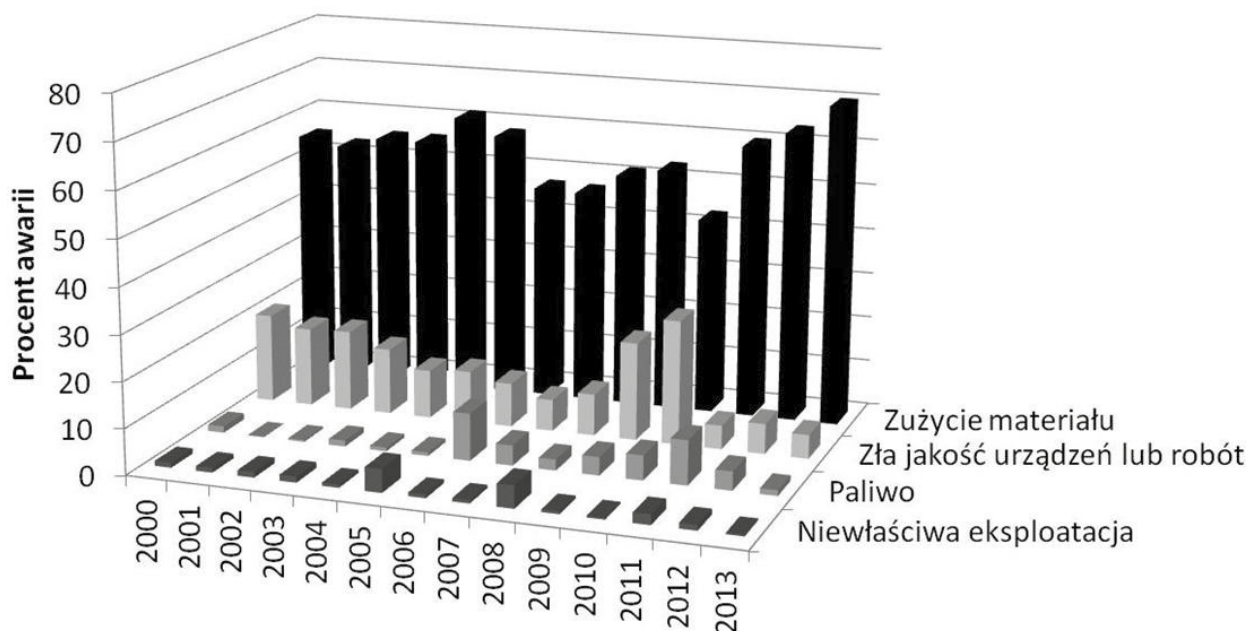
Strategie remontowe stosowane w wielu gałęziach przemysłu, w tym również w energetyce, można podzielić na

trzy zasadnicze grupy (rys. 4). Pierwsza grupa strategii remontowych jest oparta na obsługach planowo-zapobiegawczych. Zarówno zakres obsługi, jak i moment jej przeprowadzenia jest dobierany arbitralnie przy uwzględnieniu zasobu doświadczeń remontowych nabytych podczas poprzednich obsług danego typu obiektów. Kolejną grupą strategii remontowych jest podejście wykorzystujące aktualny stan techniczny obiektu. Metodologia zwana

również CBM - *Condition Based Maintenance* uzależnia decyzje remontowe od tzw. diagnostycznych symptomów stanu technicznego. Ostatnia grupa strategii remontowych opiera się na analizie niezawodności lub ryzyka technicznego na podstawie probabilistycznych badań historii eksploatacji.

### Strategie remontowe oparte na stanie technicznym

Symptom stanu technicznego jest mierzalnym parametrem diagnostycznym związanym z eksploatacją danego urządzenia czy maszyny, który jest silnie skorelowany z szeroko pojętym stanem technicznym tego urządzenia. Informacja ta pozwala na wykrycie zbliżającej się awarii i umożliwia reakcję służb remontowych, nim dojdzie do drastycznej awarii. Zagadnienie to jest szczególnie ważne w tych gałęziach przemysłu i gospodarki, w których pojawienie się nieplanowanego postoju awaryjnego wiąże się z dużym ryzykiem strat finansowych, środowiskowych lub innych. Proponowana strategia jest związana z wykorzystaniem diagnostycznego sympto-



Rys. 3. Główne przyczyny awarii bloków energetycznych w latach 2000-2013



Rys. 4. Ogólny podział strategii remontowych

mu stanu technicznego do określania kondycji obiektu i przewidywania zbliżających się awarii, czyli zawiera w sobie historię eksploatacji wspomaganą aktualnym stanem technicznym obiektu. Przy optymalizacji momentu obsługi prewencyjnych w tej strategii niezbędna jest znajomość wskaźników niezawodności. Łącznikiem informacji probabilistycznej i diagnostycznej może być model proporcjonalnego zagrożenia (PHM - *Proportional Hazards Model*) [2]. Model ten opiera się na zmodyfikowanej postaci funkcji intensywności uszkodzeń, która zawiera w sobie człon wykorzystujący wartość symptomu stanu. Następnie należy wyznaczyć parametry rozkładu niezawodnościowego wykorzystując metodę maksymalizacji funkcji prawdopodobieństwa (tzw. likelihood function) [1]. Dla rozkładu Weibull'a funkcja niezawodności wykorzystująca symptom stanu ma następującą postać:

$$R(t, z(t)) = \exp \left[ -\frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot \int_0^t x^{\beta-1} \exp(\gamma z(x)) dx \right] \quad (1)$$

Przedstawione podejście zastosowano do wyznaczenia funkcji niezawodności rur parownika w kotle energetycznym [7]. Symptomem stanu był okresowy pomiar grubości rur.

Tab. 1 zawiera oszacowane parametry modelu proporcjonalnego zagrożenia uwzględniającego informację diagnostyczną.

”

Pierwszym sposobem oddziaływania na poziom ryzyka jest sterowanie eksploatacją.

Rys. 5 przedstawia przebieg oszacowanej funkcji prawdopodobieństwa awarii rury parownika, wyznaczonej dla ekstrapolacji linii trendu symptomu stanu bazując na jednej, dwóch,.... lub sześciu pierwszych inspekcjach wybranej rury.

Krzywe wykreślono, korzystając z oszacowanych parametrów z tab. 1. Gwałtowny wzrost prawdopodobieństwa awarii potwierdza silną korelację informacji diagnostycznej ze stanem technicznym rur. Analiza niezawodności z wykorzystaniem symptomu stanu ułatwia podejmowanie właściwych decyzji remontowych dotyczących badań diagnostycznych. Szerszy opis tej metody podano m. in. w [7].

Tab. 1. Oszacowane parametry rozkładu Weibulla dla danych testowych

|              | Z symptomem stanu z(t) | Bez symptomu stanu |
|--------------|------------------------|--------------------|
| $\alpha$ [h] | 33 408                 | 22 551             |
| $\beta$ [-]  | 2,710                  | 5,716              |
| $\gamma$ [-] | 3,141                  | -----              |

## ■ Optymalizacja decyzji remontowych z uwzględnieniem ryzyka

Ryzyko techniczne RT, rozumiane jako iloczyn prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia niepomyślnego P oraz jego skutków K, jest ważnym pojęciem umożliwiającym racjonalizację eksploatacji różnych systemów, w tym również maszyn, urządzeń i bloków energetycznych [3, 4, 5]. Jeżeli miarą skutków i konsekwencji uszkodzenia lub awarii są środki pieniężne wyrażone jednostką monetarną, to w takim przypadku jednostką ryzyka technicznego jest także jednostka monetarna. Ryzyko techniczne możemy wyznaczyć z zależności:

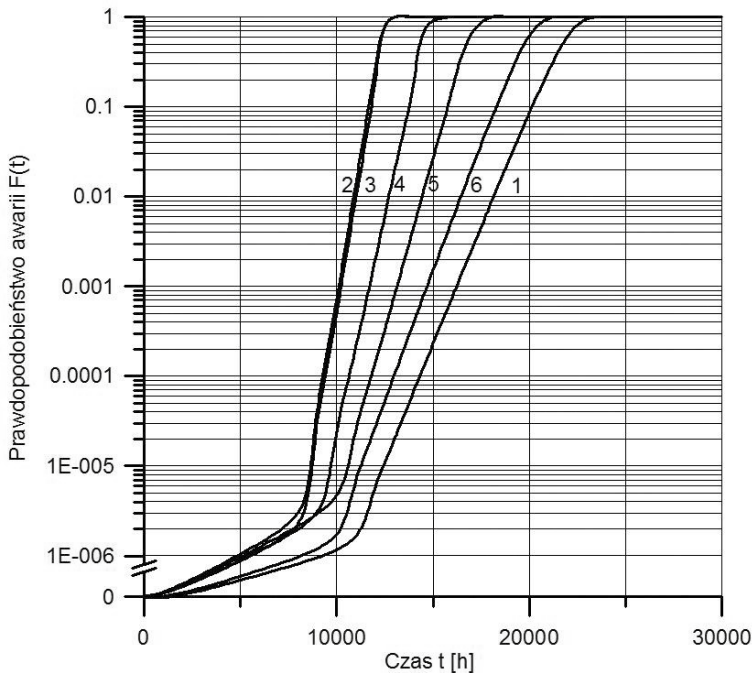
$$R_T = P \cdot K \quad (2)$$

W przypadku analizy złożonych systemów ryzyko systemu jest sumą ryzyka elementów podrzędnych zgodnie z zależnością (3).

$$R_T = \sum_{i=1}^n R_{T_i} = \sum_{i=1}^n P_i K_i \quad (3)$$

Celem analizy ryzyka jest ocena ryzyka związanego z istnieniem i eksploatacją danego systemu. Ocena ta to podstawowy element działań zmierzających do obniżenia bądź utrzymania ryzyka na wymaganym poziomie. Pierwszym sposobem oddziaływania na poziom ryzyka jest sterowanie eksploatacją. Innym ważnym elementem procedury zarządzania ryzykiem jest planowanie obsługi i remontów, a w szczególności planowanie zakresu i częstotliwości tych działań.

Rozróżniamy dwie podstawowe grupy metod analizy ryzyka: metody jakościowe i ilościowe. Celem metod jakościowych jest wskazanie elementów, które stwarzają najwyższy poziom ryzyka bez podawania jego wartości i jednostki. Wynikiem jakościowej analizy ryzyka jest najczęściej ranking ryzy-



Rys. 5. Prawdopodobieństwa awarii oszacowane po uwzględnieniu wyników odpowiednio 1,2,3,4,5 i 6 inspekcji wybranej rury

ka, który przedstawia względne uszeregowanie elementów objętych analizą pod kątem ryzyka. Innym wynikiem oszacowań jakościowych są jakościowe diagramy ryzyka.

”

Innym ważnym elementem procedury zarządzania ryzykiem jest planowanie obsługi i remontów, a w szczególności planowanie zakresu i częstotliwości tych działań

W analizach ilościowych wynikiem oszacowania jest liczbową wartość ryzyka wraz z jednostką, przypisana poszczególnym scenariuszom, elementom i całemu systemowi. Warunkiem niezbędnym do ilościowego oszaco-

wania ryzyka jest obliczenie prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń niebezpiecznych. W tym celu wykorzystuje się metody analityczne oraz symulacyjne. Istotne znaczenie mają również metody statystyczne i baza danych o uszkodzeniach elementów systemu. Drugim elementem koniecznym do oszacowania ilościowego ryzyka są dane o konsekwencjach uszkodzenia elementów, podsystemów i całego systemu. Dane te, wyrażone w pieniądzach, powinny być opracowane przez ekspertów techniczno-ekonomicznych z dziedziny, do której należy oceniany system. Obliczone prawdopodobieństwo uszkodzenia elementu, podsystemu lub systemu oraz odpowiadające im konsekwencje finansowe pozwalają wyznaczyć poziom ryzyka na podstawie zależności (2) lub (3).

Sposobem oddziaływania na poziom ryzyka jest odpowiednia gospodarka remontowa, i to w zakresie zarówno drobnych remontów bieżących, jak i obejmujących duże zakresy prac remontów średnich i remontów kapitalnych. Planowanie zakresu i czasu

przeprowadzania takich prac remontowych powinno również uwzględniać poziom ryzyka stwarzanego przez dane elementy i prowadzić do obniżenia tego poziomu w kolejnym okresie eksploatacji.

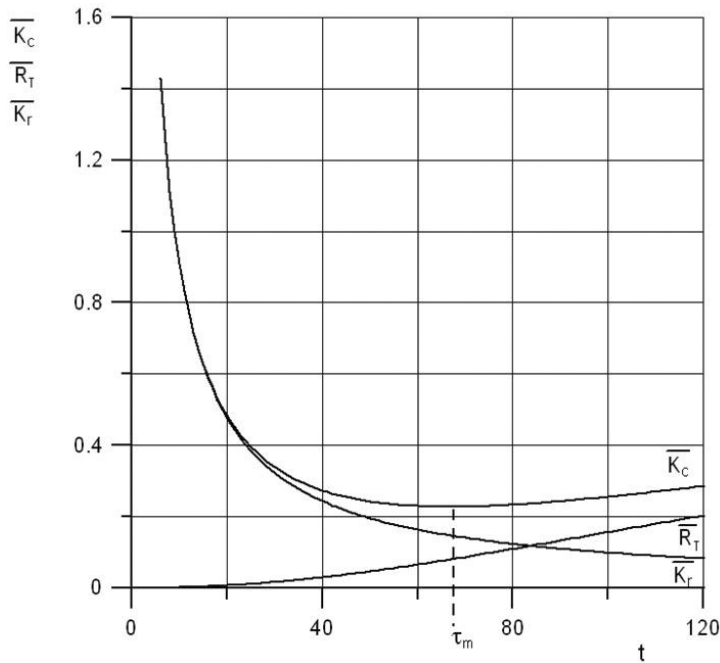
W monografii [6] zebrano, opisano szczegółowo i zilustrowano przykładami kilka strategii remontowych traktowanych jako zagadnienia optymalizacji z uwzględnieniem kryterium ryzyka. W szczególności analizowano:

- dobór zakresów remontowych przy wykorzystaniu jakościowej oceny ryzyka,
- dobór zakresów remontowych ze względu na dopuszczalny poziom ryzyka,
- dobór okresów i zakresów remontowych ze względu na dopuszczalny poziom ryzyka,
- optymalizację okresów międzyremontowych ze względu na maksymalizację zysku z eksploatacji dla pojedynczych elementów i złożonych układów,
- optymalizację okresów międzyremontowych z uwagi na efektywność remontu.

Ryzyko jest kategorią ekonomiczną i może być uwzględniane w rachunku ekonomicznym. Wykorzystując ten fakt, możemy przedstawić procedurę planowania gospodarki obsługowo-remontowej jako procedurę optymalizacji kosztów całkowitych  $K_c$ . W kosztach tych zostanie uwzględnione ryzyko RT oraz koszty remontów KR. Po odniesieniu tych kosztów do czasu eksploatacji  $t$  otrzymamy koszt jednostkowy przypadający na jednostkę czasu:

$$\bar{K}_c = \frac{K_r + R_T}{t} = \bar{K}_r + \bar{R}_T \quad (4)$$

gdzie  $\bar{K}_c, \bar{K}_r, \bar{R}_T$  są wielkościami odniesionymi do jednostki czasu. Optymalną wartość czasu trwania okresu międzyremontowego uzyskamy przez



Rys. 6. Optymalny czas remontu zespołu wirnikowego turbiny

minimalizację funkcji celu  $V$ , którą obecnie jest koszt całkowity  $\overline{K}_c$ .

Tak zdefiniowaną metodę wykorzystano do optymalizacji okresów remontów prewencyjnych zespołu wirnikowego turbiny. Do analizy szczegółowej przyjęto cztery scenariusze najczęściej spotykanych uszkodzeń zespołu wirnikowego turbin tego typu i są to:

- uszkodzenie łożysk turbiny powodujące wtórne uszkodzenie układu przepływowego,
- uszkodzenie łożysk turbiny bez uszkodzeń innych elementów,
- uszkodzenie topatki w układzie przepływowym turbiny,
- uszkodzenie uszczelnień wirnika.

Na podstawie danych statystycznych wyznaczono parametry niezawodnościowe poszczególnych elementów i koszty ich awarii. Wynik optymalizacji wg kryterium opisanego zależnością (4) podano na rys. 6. Dla przyjętych danych optymalny czas przeprowadzenia odnowy wynosi  $t_m = 67$  miesięcy. Szczegóły analizy zawarto w [6].

## Wnioski

Metody jakościowej oceny ryzyka z uwagi na ich prostotę i krótki czas potrzebny do analizy wykorzystuje się do wstępnego oszacowania poziomu ryzyka złożonych obiektów. Metody te służą także do wyselekcjonowania elementów i/lub scenariuszy awaryjnych, które zostaną objęte szczegółową analizą ilościową. Postępowanie się metodami jakościowymi wymaga jednak gruntownej wiedzy eksperckiej dotyczącej awaryjności i remontów. Podczas stosowania metod ilościowych niezbędna jest baza danych obejmująca historię eksploatacji analizowanego obiektu, a w szczególności dane dotyczące zaistniałych awarii i ich finansowych konsekwencji. Stosując metody analizy ryzyka przy podejmowaniu decyzji remontowych, uzyskuje się optymalizację kosztów przeznaczonych na remont w porównaniu z harmonogramem remontów opartym na stałych okresach między remontowych. Jednocześnie remonty o zoptymalizowanych okresach i zakresach

zapewniają w trakcie eksploatacji wymagany poziom bezpieczeństwa.

Przedstawione w artykule wyniki zostały 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  $\text{CO}_2$  ze spalin. □

## Literatura

1. Cox D. R., Oakes D.: *Analysis of Survival Data*. Chapman and Hall, London 1984.
2. Cox D.R.: *Regression models and life-tables*. *Journal of The Royal Statistical Society*, B 34, 1972, p. 187-220.
3. Faber M.H., Stewart M.G.: *Risk assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion*. *Reliability Engineering and System Safety*, 80, 2003, p. 173-184.
4. Guikema S.D., Paté-Cornell M.E.: *Component choice for managing risk in engineered systems with generalized risk/cost functions*. *Reliability Engineering and System Safety*, 78, 2002, p. 227-238.
5. Rusin A.: *Awaryjność, niezawodność i ryzyko techniczne w energetyce ciepłej*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
6. Rusin A., Wojaczek A.: *Wspomaganie planowania gospodarki remontowej oparte na analizie niezawodności i ryzyka technicznego*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
7. Wojaczek A., Rusin A.: *Szacowanie niezawodności rur parownika przy wykorzystaniu symptomu stanu*. *Rozdział monografii: Aktualne zagadnienia energetyki*. Praca zbiorowa pod red. Kazimierza Wójca, Tomasza Tietze. Oficyna Wydaw. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2014, s. 291-301.