

BADANIE EFEKTYWNOŚCI WYKRYWANIA ANOMALII PROCESOWYCH W DZIAŁANIU TURBINY PAROWEJ ELEKTROWNI JĄDROWEJ PRZY POMOCY METOD WIELOWYMIAROWEJ ANALIZY STATYSTYCZNEJ

Karol KULKOWSKI¹, Michał GROCHOWSKI², Kazimierz DUZINKIEWICZ³

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

1. tel.: 58 347 17 42 e-mail: kkulkow@eia.pg.gda.pl
 2. tel.: 58 347 29 04 e-mail: michal.grochowski@pg.gda.pl
 3. tel.: 58 347 22 39 e-mail: kazimierz.duzinkiewicz@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę możliwości wykrywania anomalii procesowych w działaniu turbiny parowej elektrowni jądrowej przy pomocy metod wielowymiarowej analizy statystycznej. Zasymlowano symptomy dwóch rodzajów uszkodzeń turbiny parowej tj. uderzenie wodne oraz, wyciek pary z zaworu części niskoprężnej. Jako narzędzie diagnostyczne wykorzystano Metodę Składowików Podstawowych PCA (z ang. Principal Component Analysis). Jako obiekt referencyjny wykorzystano nieliniowy, dynamiczny model matematyczny turbiny parowej. Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły możliwość zastosowania metody PCA do wczesnego wykrywania wybranych uszkodzeń w turbinie parowej.

Słowa kluczowe: turbina parowa, detekcja uszkodzeń, PCA.

1. WSTĘP

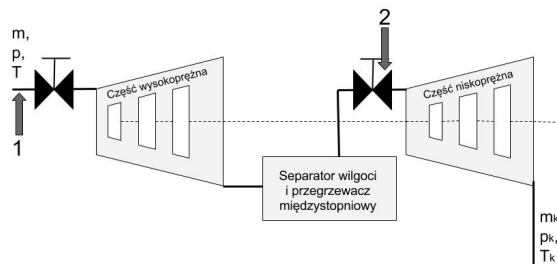
Poprawne działanie turbiny parowej, szczególnie będącej elementem systemu infrastruktury krytycznej takiego jak np. elektrownie dużej mocy, jest niezwykle istotne z finansowego i operacyjnego punktu widzenia. Bardzo ważnym problemem jest prowadzenie procesów w sposób zapobiegający lub minimalizujący ryzyko wystąpienia nieprzewidzianych awarii czy anomalii procesowych. Szczególnie istotne w tym kontekście jest efektywne monitorowanie stanu zachodzących procesów, pozwalające na wykrywanie uszkodzeń w ich wczesnym stadium lub anomalii procesowych mogących w przyszłości prowadzić do takich uszkodzeń. Rezultaty monitoringu dla celów diagnostyki pozwalają na zaplanowanie remontu urządzenia lub odpowiednią jego eksploatację, która pozwala na zapobieganie dalszemu rozwojowi uszkodzenia.

Analizowanym w niniejszym artykule urządzeniem jest turbina parowa [1] elektrowni jądrowej, będąca jednym z kluczowych elementów systemu generacji energii elektrycznej. Turbina parowa elektrowni jądrowej umożliwia zamianę energii wytwarzanej przez reaktor i wytwornicę pary na energię mechaniczną przekazywaną do generatora elektrycznego. Dokładniejsza budowa i zasada działania turbiny została opisana w [2]. Ze względu na warunki operacyjne turbiny parowej elektrowni jądrowej spowodowane jej rozmiarami i zapotrzebowaniem na generowaną przez nią moc, istnieje wysokie ryzyko

wystąpienia stanu anormalnego mogącego skutkować w przyszłości trwałym uszkodzeniem lub jej zatrzymaniem. Przykładowe uszkodzenia mogące wystąpić w turbinie parowej opisane zostały w rozdziale 2. Celem utrzymania poprawnej pracy turbiny stosuje się jej bieżącą kontrolę poprzez regularne wykonywanie pomiarów i ich odpowiednią analizę. Ze względu na trudną dostępność do niektórych części turbiny, stosuje się metody detekcji uszkodzeń bazujących na pomiarach części turbiny dostępnych z zewnątrz. Do takich metod można zaliczyć pomiar wibracji. Jednakże coraz bardziej popularnymi stają się metody eksploracji danych oparte o dane pomiarowo dostępne i umożliwiające pośrednie badanie zachowania elementów, których stan jest niemierzony. Jedną z najpowszechniej stosowanych metod jest metoda wielowymiarowej analizy statystycznej PCA (Principal Component Analysis) opisana krótko w rozdziale 3. Rozdział 4. przedstawia wyniki symulacyjne detekcji wybranych uszkodzeń turbiny parowej. W rozdziale 5. dokonano podsumowania wyników i przedstawiono dalsze plany badawcze autorów.

2. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU DETEKЦИИ USZKODZEŃ

Turbina parowa zamienia energię cieplną pary wodnej na energię mechaniczną w skutek rozprężania pary wodnej na kolejnych stopniach turbiny (rysunek 1).



Rys. 1. Schemat turbiny parowej ze wskazaniem miejsc uszkodzeń (1 – uderzenie wodne; 2 – wyciek z zaworu części niskoprężnej; m – przepływ masowy pary dolotowej; p – ciśnienie pary dolotowej; T – temperatura pary dolotowej; indeks k – indeks określający zmienne wyjściowe z turbiny parowej)

W tym celu turbina wykorzystuje parę wodną o parametrach wyrażanych: przepływem masowym (m), ciśnieniem (p) i temperaturą (T). Turbina składa się ze stopni pogrupowanych na części. Pomiędzy częściami turbiny parowej możliwe jest zastosowanie separacji wilgoci, jak również jej przegrzanie. Schemat turbiny parowej wykorzystanej do badań przedstawiony jest na rysunku 1. Cyframi 1 i 2 zaznaczono miejsca wystąpienia rozważanych stanów anormalnych turbiny.

W czasie pracy turbiny każdy jej element narażony jest na wystąpienie anomalii lub uszkodzenia, czy to na skutek zmiany warunków pracy i właściwości medium przez nią przepływającego, czy też z powodu zużycia elementu w czasie. Na podstawie [3, 4, 5] dokonano klasyfikacji i scharateryzowano najczęściej występujące uszkodzenia w turbinie, które zamieszczono w tabeli 1. Klasyfikacje przeprowadzono ze względu na elementy, w których może wystąpić uszkodzenie.

Tabela 1. Najczęściej występujące uszkodzenia

Element	Symptom	Potencjalne skutki
Wlot turbiny	Wzrost temperatury pary świeżej i wtórnej	Zmniejszenie wytrzymałości czasowej metalu może prowadzić do uszkodzenia
	Spadek temperatury pary (do kilkunastu K)	Obniżenie sprawności turbozespołu
	Spadek temperatury pary (do 50 K)	Uderzenie wodne obniża sprawność turbiny, może powodować korozję i uszkodzenie turbiny
Wlot turbiny WP	Spadek >10% ciśnienia pary dolotowej	Wzrost erozyjnego działania mokrej pary na ostatnie rzędy łopatek może skutkować ich uszkodzeniem
Stopnie turbiny	Redukcja przekroju części przepływowej, zwiększenie ciśnienia w stopniach	Osadzanie części soli zawartych w parze powoduje zmniejszanie się przekroju części przepływowej
Zawór	Spadek ciśnienia i przepływu masowego za zaworem	Uszkodzenie elementu w zaworze pogarsza wydajność turbiny
Łopaty wirnika	Zaburzenie parametrów pary (ciśnienie, temperatura, przepływ masowy)	Erozja spowodowana stałymi cząsteczkami lub cząsteczkami wody, może powodować erozję łopat, uszkodzenia mechaniczne lub złamanie łopaty
Wrzeciono zaworu	Spadek ciśnienia i przepływu masowego za zaworem	Zużycie, uszkodzenie prowadzi do wycieku czynnika

Uszkodzeniami poddanymi analizie i przedstawionymi w artykule (rys. 1) są: uderzenie wodne oraz wyciek z zaworu umieszczonego przed częścią niskoprężną turbiny.

Uderzenie wodne może następować stopniowo lub gwałtownie. Jest spowodowane przez obniżenie się temperatury pary dolotowej części wysokoprężnej turbiny parowej elektrowni jądrowej, przy jednoczesnym zachowaniu pozostałych parametrów pary wodnej. Anomalia ta może mieć swoje źródło na drodze wytwornicy pary -

turbina i może być spowodowana przez anormalną pracę wytwornicy pary. Spadek temperatury pary przy utrzymaniu ciśnienia i ilości przepływającego medium może mieć destrukcyjne skutki dla turbiny, powodując korozję oraz powodując uszkodzenie turbiny poprzez zmianę procesu rozprężania w stopniach turbiny. Początkowo spadek temperatury obniża jedynie sprawność turbiny, jednak przy różnicy temperatur przekraczającej 50K turbinę należy odstawić. W związku z tym niezwykle istotne jest jak najszybsze wykrycie postępującego uszkodzenia.

Wyciek pary z zaworu części niskoprężnej może być natychmiastowy lub postępować stopniowo, powodując coraz większy ubytek masy przepływającej przez zawór, co wpływa bezpośrednio na ciśnienie za zaworem w części niskoprężnej. W artykule przedstawiono analizę stopniowo zwiększającego się uszkodzenia tego typu. Tego rodzaju uszkodzenie, wpływa na stabilność pracy części turbiny umiejscowionej za wyciekami i może prowadzić do wystąpienia poważniejszych uszkodzeń.

3. WCZESNE WYKRYWANIE USZKODZEŃ – METODA PCA

W celu wczesnej detekcji analizowanych stanów anormalnych w turbinie parowej, w niniejszym artykule wykorzystano metodę Analizy Składników Podstawowych PCA [6], która należy do podstawowych narzędzi z rodziny metod wielowymiarowej analizy statystycznej. Głównym celem PCA jest analiza liniowych korelacji pomiędzy zmiennymi pomiarowymi posiadanego zbioru danych. W konsekwencji często dokonywana jest redukcja wymiarów danych wykorzystywanych do dalszej analizy. Jej stosowanie jest wskazane, gdy dane są ze sobą skorelowane liniowo. Zastosowanie PCA skutkuje zastąpieniem tradycyjnych zmiennych, np. pomiarów z czujników, nowymi zmiennymi zwanymi składnikami głównymi, będącymi kombinacjami liniowymi informacji zawartych w oryginalnych zmiennych.

Celem zapewnienia równorzędnego znaczenia zmiennych w sensie statystycznym, na wstępie procedury dane wejściowe X o wymiarze M zmiennych i N obserwacji są normalizowane zgodnie ze wzorem (1):

$$X_{Norm} = (X - I \cdot X^{mean}) \Sigma^{-1} \quad (1)$$

gdzie: X – dane wejściowe, I – wektor jednostkowy, Σ – macierz diagonalna odchyłeń standardowych poszczególnych kolumn macierzy X , X^{mean} – wektor średnich wartości poszczególnych kolumn macierzy X .

Następnie wyznacza się macierz korelacji danych R (2), która dla danych znormalizowanych jest tożsama z macierzą kowariancji. Elementy macierzy R odzwierciedlają poziom liniowej zależności pomiędzy poszczególnymi zmiennymi.

$$R = \frac{1}{N-1} X_{Norm}^T X_{Norm} \quad (2)$$

Wyznaczając wartości własne λ i wektory własne macierzy korelacji R określa się stopień korelacji pomiędzy wektorami własnymi będącymi nowymi składnikami głównymi. Sortując wartości i wektory własne malejąco według wartości własnych zobrazować można jak cenna jest informacja przenoszona przez dany składnik główny.

Im większa wartość własna tym mniejsza korelacja, a co za tym idzie, tym cenniejsza jest informacja jaką odpowiadający jej składnik reprezentuje. Kolumnowe wektory własne tworzą macierz zwaną macierzą przeładowań V . Macierz ta umożliwia zastosowanie transformacji liniowej (3) danych znormalizowanych do przestrzeni składników głównych. Proces ten jest procesem odwracalnym.

$$X_{Norm}^{PCA} = X_M V \quad (3)$$

gdzie: X_M – wektor wejściowy o rozmiarze M zmiennych, V – macierz przeładowań.

Analiza PCA prowadzi do redukcji ilości zmiennych opisujących dany proces do r głównych składowych niosących najistotniejsze informacje, co pozwala na późniejszą efektywniejszą analizę ewentualnych zmian stanu opisywanego procesu. Powoduje to redukcję macierzy przeładowań V do V^{red} .

Dysponując gotowym modelem, możemy przystąpić do monitoringu procesu, który odbywa się w oparciu o miary jakości wyznaczane dla bieżących obserwacji. Miary te określają jak dobrze aktualny stan systemu wpasowuje się w model zbudowany na podstawie danych treningowych.

Najczęściej stosowane są dwie miary [7]: T^2 (miara Hotellinga) oraz SPE (ang. Squared Prediction Error, inaczej zwana jako Q-statistic).

Miara SPE (4) pozwala określić popełniony błąd rekonstrukcji podczas redukcji danych do przestrzeni r -wymiarowej.

$$SPE = \left\| X_{Norm}^{PCA} - X_{Norm}^{PCA(r)} \right\|^2 \quad (4)$$

gdzie: $X_{Norm}^{PCA(r)}$ - zbiór danych zredukowany do r istotnych składników podstawowych.

SPE określa w jakim stopniu dana próbka wpisuje się w zależności reprezentowane przez model PCA. Model ten na etapie treningu jest budowany w taki sposób, aby optymalnie odzwierciedlić strukturę danych treningowych. Wysoka wartość SPE, sygnalizująca duży błąd rekonstrukcji, oznacza, że bieżąca próbka nie spełnia zależności zidentyfikowanych w danych treningowych, co sugeruje wystąpienie anomalii.

Miara SPE kontroluje jedynie czy spełnione są liniowe zależności wynikające z danych treningowych, nie umożliwia jednak wyciągnięcia wniosków dotyczących samych wartości parametrów. W związku z tym celowym jest stosować miarę Hotellinga (5).

$$T^2 = x_T V^{zred} \lambda^{-1} V^{zredT} x_T^T \quad (5)$$

Punkty o jednakowej wartości T^2 tworzą hipereliptyczne powierzchnie o promieniach proporcjonalnych do rozłożonych wzdłuż nich wariacji sygnału. Dla obu miar na etapie tworzenia modelu wyznaczane są miary graniczne, których przekroczenie sygnalizuje wystąpienie anomalii lub uszkodzenia.

Warunkiem skuteczności działania metody PCA jest liniowość zależności reprezentowanych przez dane treningowe oraz reprezentatywność danych treningowych. W przypadku nieliniowym skuteczność PCA może być

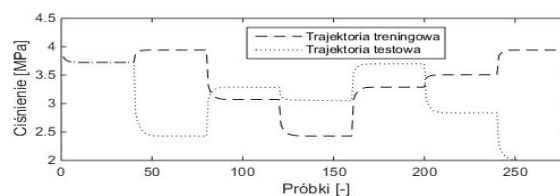
niższa, np. mogą występować fałszywe alarmy lub część stanów anormalnych może nie być wykrywana.

4. WYNIKI SYMULACJI

W artykule badaniom poddano uszkodzenia turbiny parowej elektrowni jądrowej typu 4CK465. Ze względu na trudność pozyskania danych pomiarowych, posłużono się opracowanym wcześniej przez zespół badawczy modelem turbiny. Model bazuje na publikowanym wcześniej przez autorów prac [2, 8], wcześniejszym modelu, jednak charakteryzuje się on większym stopniem szczegółowości, głównie ze względu na modelowanie każdego stopnia turbiny osobno, co pozwoliło na dokładniejszą analizę stanów przejściowych procesów zachodzących wewnątrz turbiny.

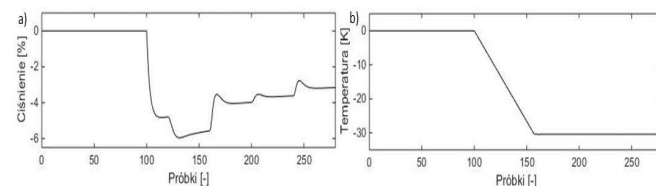
Danymi wykorzystanymi w procesie budowy modelu PCA dla celów monitorowania są dostępne ciśnienia (18 zmiennych) i temperatury pary (19 zmiennych) mierzone wzdłuż turbiny, co daje 37 zmiennych. Należy podkreślić, że na potrzeby monitorowania nie wykorzystywano przepływów masowych dostępnych w modelu turbiny, a biorących udział w generowaniu uszkodzenia, jakim jest wyciek. Powodem jest trudność fizycznej realizacji takich pomiarów. Wygenerowano dane pomiarowe o okresie próbkowania 1 sek. w czasie pracy turbiny przez 280 sek.

W wyniku przeprowadzonej analizy zastosowano model PCA o 5 składnikach podstawowych, przy czym przyjęto stopień ufności dla danych pomiarowych równy 0,95 (95% ufności danym). Zastosowanie takich parametrów pozwoliło na uzyskanie informacji niesionej przez model PCA o wartości powyżej 99% informacji zawartej w danych treningowych. Detekcję przeprowadzono dla trajektorii treningowej, przy której tworzony był model PCA dla turbiny sprawnej, jak również dla trajektorii testowej. Trajektorie te przedstawiono na rysunku 2.



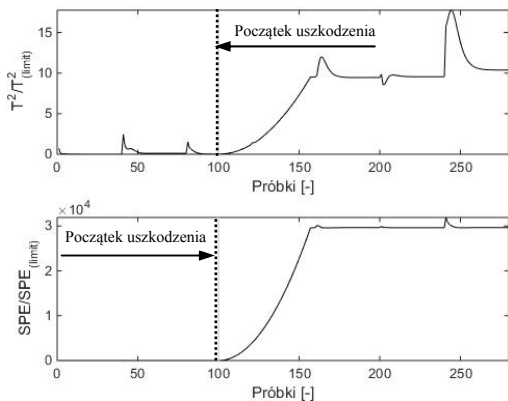
Rys. 2. Trajektorja wymuszenia (treningowa i testująca) – ciśnienie za zaworem sterującym części wysokoprężnej turbiny parowej

Dodatkowo na rysunku 3 przedstawiono profile symulowanych uszkodzeń. Wyniki detekcji uszkodzeń przedstawione są odpowiednio na rysunkach 4 i 5. Oba uszkodzenia rozpoczynały się w setnej sekundzie symulacji, co zostało zaznaczone na rysunkach pionową linią.



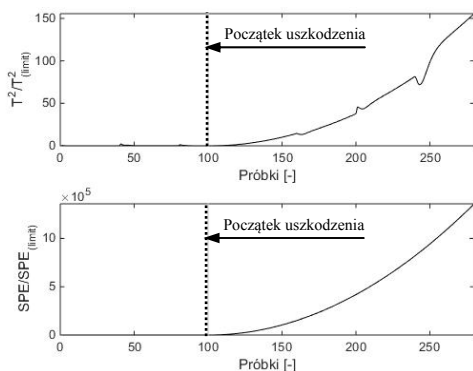
Rys. 3. a) Skutek wycieku - procentowa różnica ciśnienia między pracą normalną a z uszkodzeniem (ciśnienie za zaworem części niskoprężnej turbiny parowej) oraz b) spadek temperatury pary dolotowej na skutek uderzenia wodnego





Rys. 4. Uderzenie wodne dla trajektorii testowej, miary (od góry): $T^2/T^2_{(limit)}$, $SPE/SPE_{(limit)}$ (początek uszkodzenia – 100. próbka)

Miary pokazane na wykresach zostały odniesione do ich wartości granicznych wyliczonych w trakcie budowy modelu, stąd granicą odniesienia, powyżej której interpretuje się wykrycie uszkodzenia jest wartość równa jedności. Jak można zaobserwować w trakcie normalnej pracy turbiny (przed setną sekundą) obie miary posiadają wartości bliskie zeru. Pojawiają się jednak momenty, w których miara T^2 przekracza graniczną wartość 1 (rysunek 4.) sygnalizując fałszywe alarmy. Sytuacja taka jest prawdopodobnie spowodowana zastosowaniem liniowego modelu PCA do analizy procesów nieliniowych.



Rys. 5. Wyciek z zaworu dla trajektorii testowej, miary (od góry): $T^2/T^2_{(limit)}$, $SPE/SPE_{(limit)}$ (początek uszkodzenia – 100. próbka)

Obserwując szybkość narastania wartości miar w czasie, w skutek narastających uszkodzeń, można stwierdzić, że uszkodzenie jest wykrywane odpowiednio wcześniej i skutecznie.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Metoda PCA zaproponowana w artykule dla celów detekcji uszkodzeń w turbinie parowej elektrowni jądrowej okazuje się metodą spełniającą wymagania odpowiednio wczesnej detekcji uszkodzenia. Jak wynika z przeprowadzonych badań zaprezentowanych w rozdziale 4., uszkodzenia zostają wykryte prawie natychmiast od chwili ich wystąpienia.

Pomimo faktu, że metoda PCA bada liniowe zależności między zmiennymi i nieliniowego charakteru badanego obiektu, jest ona efektywna przy wykrywaniu anomalii procesowych turbiny parowej elektrowni jądrowej.

Z uwagi na swoje ograniczenia, nie wszystkie uszkodzenia czy anomalie procesowe występujące w turbinie parowej, mogą być efektywnie diagnozowane.

Dalsze prace autorów skupiać się będą nad próbą nie tylko wykrycia, ale również lokalizacji uszkodzenia w turbinie parowej z wykorzystaniem PCA oraz nieliniowego PCA, jak również innych metod eksploracji danych np. SVM (Maszyny Wektorów Podtrzymujących) czy też przy pomocy sztucznych sieci neuronowych.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Pawlik M., Strzelczyk F.: Elektrownie, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2014.
2. Kulkowski K., Kobylarz A., Grochowski M., Duzinkiewicz K.: Dynamic model of nuclear power plant steam turbine, Archives of Control Sciences, Volume 25(LXI), 2015, s. 65-86.
3. Janiczek R.: Eksploatacja elektrowni parowych, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1980.
4. http://www.plant-maintenance.com/articles/steam_turbine_analysis.shtml (25.01.2016)
5. Salahshoor K., Kordestani M., Khoshro M. S.: Fault detection and diagnosis of an industrial steam turbine Using fusion of SVM (support vector machine) and ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system) classifiers, Energy, Volume 35, 2010, s. 5472-5482.
6. Duzinkiewicz K., Borowa A., Mazur K., Grochowski M., Brdyś M. A., Jezior K.: Leakage Detection and Localisation in Drinking Water Distribution Networks by MultiRegional PCA.
7. Jackson J. E.: A User's Guide To Principal Components, JOHN WILEY & SONS, INC., 1991.
8. Sokółski P., Kulkowski K., Kobylarz A., Duzinkiewicz K., Rutkowski T. A., Grochowski M.: Wieloobszarowa Regulacja Systemu Turbogenerators Elektrowni Jądrowej, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Numer 42., Gdańsk 2015, s. 129-132.

EFFICIENCY OF PROCESS ABNORMALITY DETECTION IN STEAM TURBINE OF NUCLEAR POWER PLANT USING MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS METHODS

Article presents an analysis of the possibility of anomaly detection process in nuclear power plant steam turbine using the methods of multivariate statistical analysis. Two types of steam turbine faults were simulated: water hammering and leakage of low pressure part valve. As a diagnostic tool a PCA (Principal Component Analysis) was used. As a reference a nonlinear, dynamic mathematical model of steam turbine was used. The possibility of applying PCA method for early detection in the steam turbine was confirmed by conducted simulations.

Keywords: steam turbine, fault detection, PCA.