Jerzy Trzeszczyński, Marcin Hatłas, Wojciech Murzynowski
Przedsiębiorstwo Usług Naukowo-Technicznych „Pro Novum" Sp. z o.o.

Wykorzystanie parametrycznych bliźniaków cyfrowych do analizy trwałości kadłubów turbiny podczas uruchomień

The application of parametric digital twins to analyze the lifetime of turbine casings during start-ups

Kadłuby turbiny, jako elementy krytyczne bloku energetycznego, są poddawane zmiennym obciążeniom termicznym i mechanicznym. Charakter obciążeń powoduje względnie duże deformacje kadłubów oraz ich uszkodzenia związane ze zmęczeniem termomechanicznym. Wykorzystując symulację komputerową (MES) możliwe jest wyznaczenie stanów naprężenia i przemieszczenia kadłubów w trakcie ich pracy oraz w czasie uruchomień i odstawień. Uzyskane wyniki symulacji pozwalają na określenie lokalizacji najbardziej wytężonych miejsc oraz na oszacowanie zmian trwałości elementów. Niestety, ze względu na rozmiar modeli numerycznych potrzebnych do uzyskiwania wysokiej jakości wyników obliczeń i średnie dostępne moce obliczeniowe stacji inżynierskich, czas symulacji uniemożliwia prowadzenie obliczeń w czasie rzeczywistym. Rozwiązaniem tego problemu jest sprowadzenie modelu numerycznego do modelu zredukowanego, który odzwierciedla zachowanie modelu MES znacznie zmniejszając koszt obliczeniowy konieczny do prowadzenia symulacji. Parametryczne modele zredukowane kadłubów turbin umożliwiają analizę ich stanu wytężenia w czasie rzeczywistym oraz dla symulowanych warunków pracy. Zastosowanie modeli zredukowanych pozwala również na prognozowanie trwałości elementów, co przekłada się na możliwość wdrożenia planów badań i remontów opartych na analizie pracy i rzeczywistego obciążenia urządzenia. W artykule przedstawiono przykład zastosowania podejścia do oceny trwałości kadłubów turbiny z wykorzystaniem parametrycznych modeli zredukowanych.

Słowa kluczowe: ocena trwałości kadłubów turbiny, parametryczne modele zredukowane kadłubów turbin, możliwości zastosowania parametrycznych bliźniaków cyfrowych (Digital Twin) do analizy trwałości kadłubów turbiny

The turbine casings, as the critical components of a power unit are subjected to variable thermal and mechanical loads. The nature of the loads causes relatively large casings deformations and their damage due to thermomechanical fatigue. By the application of numerical simulation (FEM), it is possible to determine the stress state and displacements of the casings during their operation, startups and shutdowns. The obtained computation results allow to find the most stressed locations and to estimate changes in the components durability. Unfortunately, due to the size of numerical models necessary to obtain high-quality computations results and the computing power of a typical engineering workstation, the simulation time makes it impossible to perform real-time simulation. The solution to the described issue is application of reduced order models, which reflect the behavior of the FEM model, significantly reducing the computational cost. Parametric reduced order models (PROM) of the turbine casings enable the analysis of casings stress state in real time and for simulated operation conditions. The application of PROM also allows forecasting the components durability, which translates into the possibility of implementing test and repair plans based on the analysis of the work and actual load of the casings. An example is presented in the paper of the approach to assessing the durability of turbine casing with the application of PMOR will be presented.

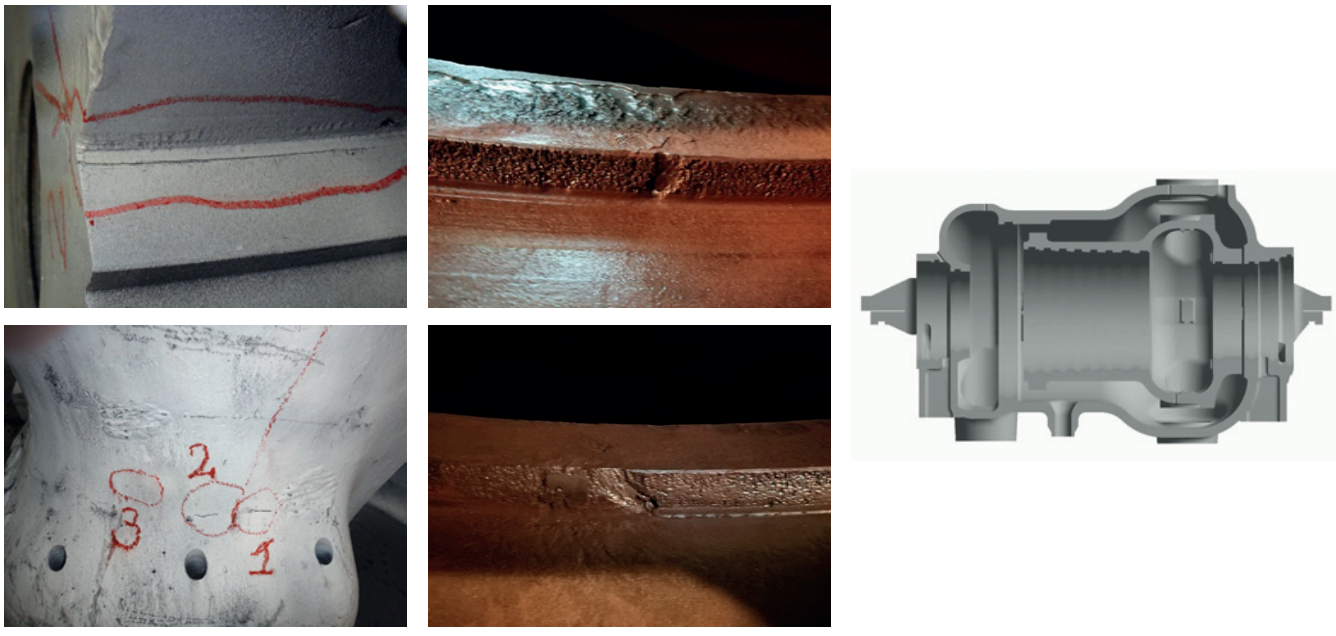
Keywords: lifetime assessment of turbine casings, parametric reduced models of turbine casings, possibilities of using parametric digital twins for the lifetime analysis of turbine casings

Wstęp

Dotychczas obliczenia numeryczne/symulacje komputerowe MES w znacznej mierze wykorzystywane były w projektowaniu nowych konstrukcji czy optymalizacji już istniejących. Wraz z rozwojem technologii cyfrowych wzrastają możliwości związane z wykorzystaniem metod numerycznych nie tylko w doskonaleniu projektowania, ale także w obszarze eksploatacji urządzeń/elementów [1, 2]. W artykule przedstawiono przykład możliwości zastosowania parametrycznych bliźniaków cyfrowych (Digital Twin) w celu analizy trwałości kadłubów turbiny, które mogą ulegać uszkodzeniom na skutek zmęczenia, erozji czy deformacji. Teoretycznie występować mogą także uszkodzenia o charakterze pełzaniowym, w praktyce, zwłaszcza w kadłubach części WP i SP turbin klasy 200 MW, wykrywa się je jednak sporadycznie. Przykłady uszkodzeń zaprezentowano na rysunku 1. O ile erozyjno-korozyjne mechanizmy uszkodzeń są praktycznie niepoliczalne, o tyle stopień wyczerpania trwałości kadłubów od zmęczenia można z powodzeniem szacować z zastosowaniem technologii jw. na podstawie analizy ich rzeczywistych warunków pracy.

Modelowanie komputerowe kadłubów

Modelowanie komputerowe kadłuba turbiny rozpoczyna się od utworzenia modelu geometrycznego CAD. Model ten tworzony jest na podstawie dokumentacji technicznej, najczęściej powykonawczej, oraz pomiarów wykonywanych na obiekcie rzeczywistym w trakcie remontów lub badań diagnostycznych. W celu zwiększenia jakości modelu numerycznego powinno zapewnić się możliwie najdokładniejsze odwzorowanie geometryczne rzeczywistego kadłuba turbiny uwzględniając aktualny stan obiektu spowodowany jego dotychczasową pracą. W *Pro Novum* w celu tworzenia modeli geometrycznych (rys. 2) wykorzystywane są narzędzia pakietu ANSYS Workbench, tj. ANSYS SpaceClaim.

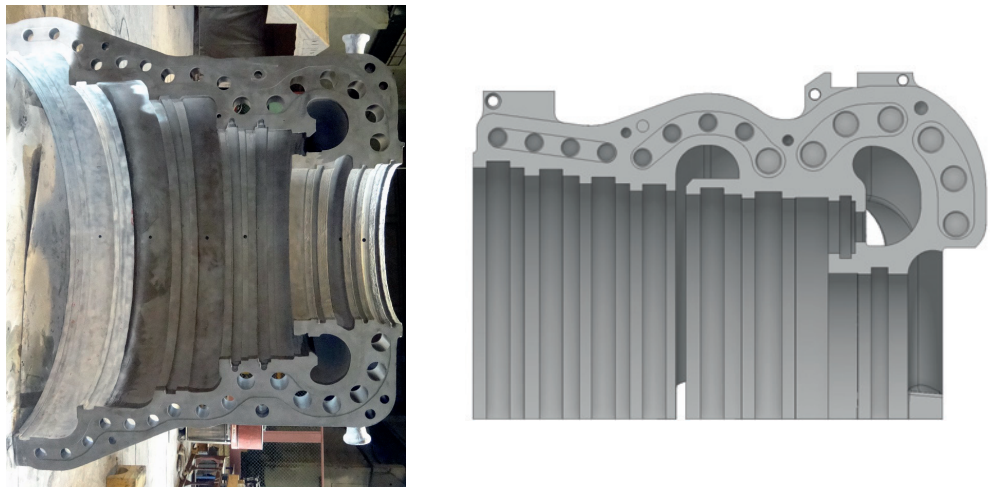


Pęknięcia zmęczeniowe

Erozja

Deformacje

Rys. 1. Przykłady uszkodzeń kadłubów turbiny



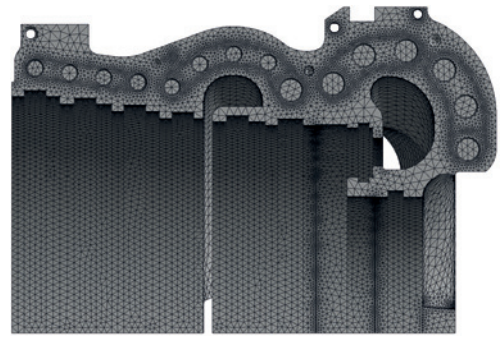
Geometria rzeczywistego korpusu

Model geometryczny

Rys. 2. Model geometryczny kadłuba turbiny

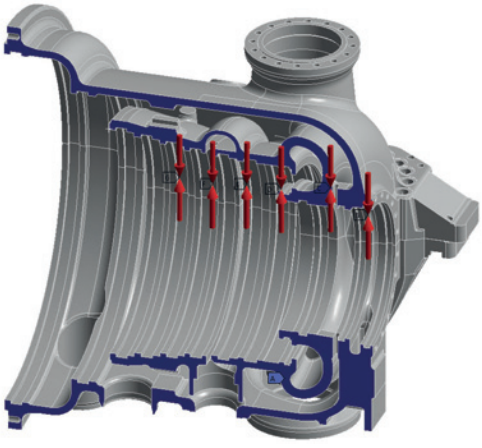
Dysponując komputerowym modelem geometrii kadłuba można wykorzystać metody numeryczne, takie jak metoda elementów skończonych (MES) do symulacji stanów wytężenia materiału korpusu. W tym celu przygotowany model geometryczny dyskretyzuje się tworząc siatkę elementów skończonych (rys. 3). Ze względu na skomplikowany kształt kadłuba sugerowane jest stosowanie lokalnie zagęszczonej siatki elementów tetragonalnych.

Dzięki takiemu podejściu znacznie skraca się czas przygotowania geometrii do dyskretyzacji, wydłużając tym samym czas obliczeń ze względu na większą liczbę węzłów i elementów modelu numerycznego.

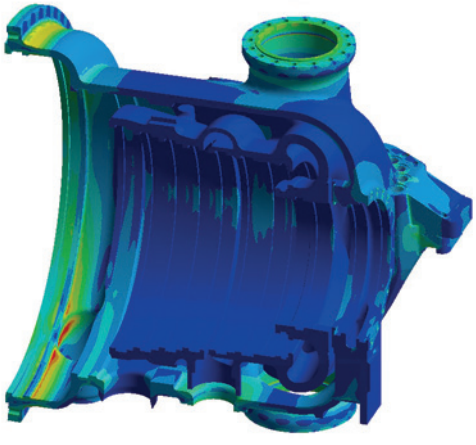


Rys. 3. Siatka elementów skończonych kadłuba turbiny

Dane materiałowe zasilające model numeryczny powinny być określone na podstawie badań materiałowych wykonanych na obiekcie rzeczywistym. W przypadku braku dostępu do takich badań należy korzystać z norm opisujących właściwości danego materiału i ze względów bezpieczeństwa przyjmować wartości prowadzące do najbardziej konserwatywnego podejścia do symulacji.



Rys. 4. Przykład zadanych warunków brzegowych na kadłubach



Rys. 5. Przykład wyników naprężeń uzyskanych po przeprowadzeniu symulacji numerycznej

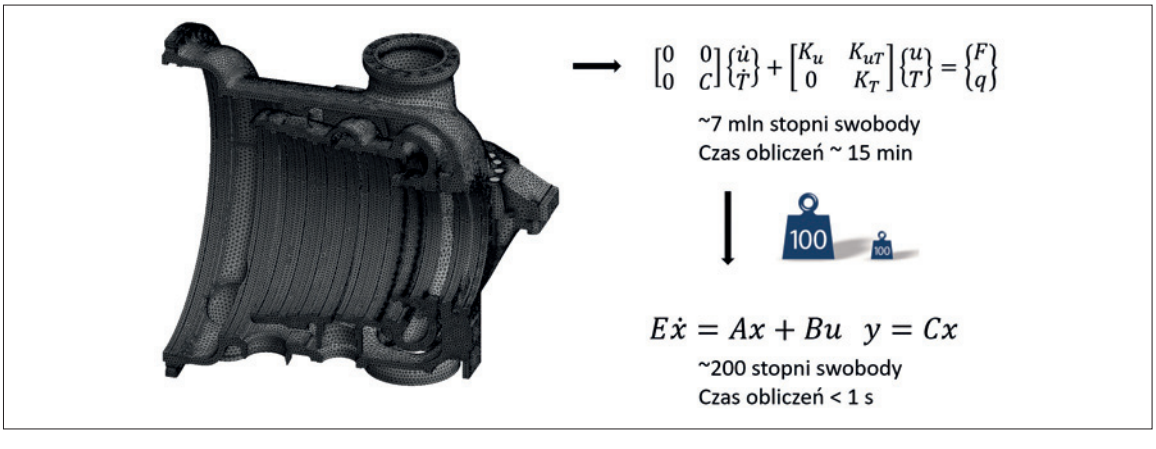
W celu wykonania symulacji komputerowej na model numeryczny należy narzucić obciążenia i warunki brzegowe (rys. 4) wynikające z charakteru pracy elementu. W przypadku analizy kadłubów turbiny najistotniejsze jest uwzględnienie obciążeń o charakterze termicznym oraz mechanicznym. Oddziaływania termiczne są bezpośrednio związanie z przepływem medium roboczego przez kolejne stopnie turbiny. Takie obciążenia mogą być modelowane za pomocą warunków konwekcyjnej wymiany ciepła. Dane dotyczące warunków brzegowych powinny być zasilane oraz walidowane danymi procesowymi z systemu kontrolno-pomiarowego elektrowni. Przekształcenia prowadzące do otrzymania parametrów medium na kolejnych stopniach należy wykonać na podstawie praw termodynamiki oraz opracowań eksperckich dostępnych w literaturze. Obciążenia mechaniczne związane są z ciśnieniem medium i elementami współpracującymi z kadłubem turbiny (rurociągi, zawory itp.).

Wynikami symulacji kadłubów (rys. 5) są ich stany termiczne w czasie pracy turbiny, które wraz z obciążeniami mechanicznymi przekładają się na stan przemieszczeń i naprężeń. Dla weryfikacji jakości modelu numerycznego otrzymywane przebiegi temperatury metalu oraz wydłużeń powinny być walidowane z sygnałami z odpowiednich czujników.

Parametryczny bliźniak cyfrowy kadłuba

Zwalidowany model numeryczny może posłużyć do utworzenia modelu zredukowanego kadłuba – parametryczny bliźniak cyfrowy kadłuba, który pozwala na znaczne zmniejszenie modelu numerycznego (zmniejszenie liczby stopni swobody – niewiadomych modelu), co przekłada się na znaczny wzrost prędkości wykonywanych obliczeń. Zredukowany model numeryczny pozwala na prowadzenie obliczeń w czasie rzeczywistym umożliwiając ciągłe monitorowanie naprężeń wynikających z aktualnego stanu obciążenia kadłuba.

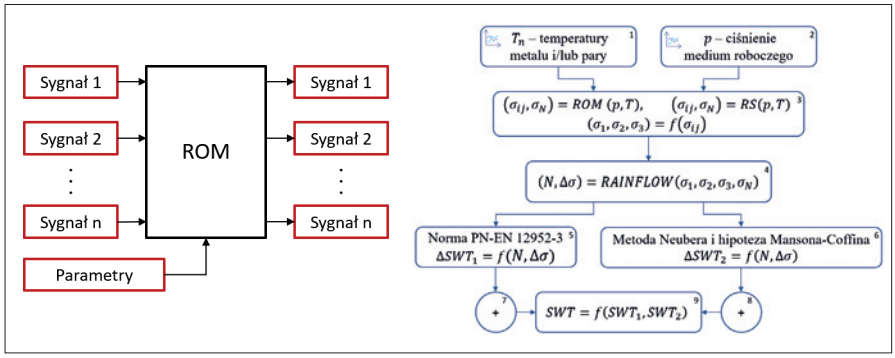
Matematyczna redukcja modelu opiera się na odpowiedniej modyfikacji macierzy opisujących model MES, sprowadzając go do uproszczonego układu równań stanu (rys. 6). Układ ten pozwala na uzyskiwanie bardzo wysokiej jakości wyników z określonych wstępnie lokalizacji modelu numerycznego. W celu redukcji wykorzystywane jest narzędzie Model Order Reduction inside ANSYS firmy *CADFEM.*



Rys. 6. Proces przygotowania cyfrowego bliźniaka kadłuba turbiny

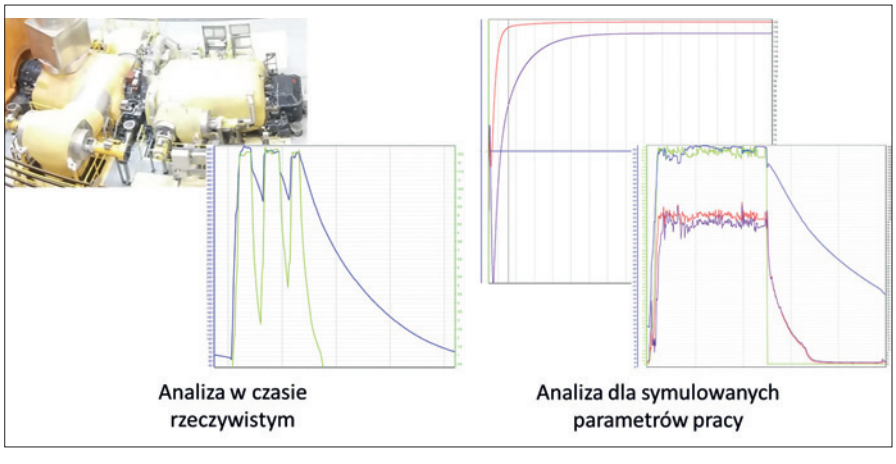
Zastosowanie cyfrowych bliźniaków kadłubów turbin

Przygotowane w wyżej opisany sposób cyfrowe bliźniaki kadłubów (ROM z ang. Reduced Order Model) implementuje się w odpowiednio do tego przygotowanym Systemie/środowisku informatycznym *Pro Novum* [3], które umożliwia analizę stanu wytężeniowego kadłubów na podstawie rzeczywistych ich warunków pracy udostępnianych z Elektrowni w sposób zdalny. Wyniki analizy naprężeniowej z wykorzystaniem cyfrowych bliźniaków stanowią parametry wejściowe do procedury obliczeniowej (rys. 7) związanej bezpośrednio z trwałością kadłubów. Równolegle takie same bliźniaki można zaimplementować w środowisku IT Elektrowni, a wyniki ich analiz udostępniać – w zależności od potrzeb – operatorom bloku i/lub specjalistom utrzymania majątku produkcyjnego [3].



Rys. 7. Integracja cyfrowych bliźniaków z rzeczywistymi warunkami pracy elementów i procedurami obliczeniowymi

Ważną cechą cyfrowych bliźniaków, oprócz bieżącej analizy naprężeniowej i trwałościowej kadłubów, jest także możliwość symulowania innych/zmiennych warunków pracy kadłubów czy innych elementów bloku (rys. 8). W przypadku planowanej zmiany reżimu warunków pracy takich elementów, w szybki i bezpieczny sposób, za pomocą możliwości symulacyjnych cyfrowych bliźniaków, sprawdzić można czy planowane zmiany mają istotny wpływ na wytężenie elementów. Symulacje takie umożliwiają także wprowadzenie odpowiednich korekt w procedurach diagnostycznych takich elementów z uwagi choćby na identyfikację nowych potencjalnych stref uszkodzeń.



Rys. 8. Wykorzystanie cyfrowych bliźniaków do analiz w czasie rzeczywistym i symulowanych warunkach pracy

Wykorzystując możliwości analiz rzeczywistych i symulowanych warunków pracy kadłubów turbin w odpowiednio przygotowanym diagnostycznym środowisku testowym w *Pro Novum,* odpowiednio zintegrowanym ze środowiskiem informatycznym Elektrowni, stworzono warunki do sprawowania zdalnej diagnostyki tych elementów w sposób nowoczesny, efektywny ekonomicznie oraz bezpieczny [3].

Podsumowanie

Przedstawiona metoda wykorzystania parametrycznych bliźniaków cyfrowych kadłubów turbin do analizy ich trwałości wykazała, że diagnostykę turbin można wykonywać w sposób nowoczesny i bezpieczny [4,5]. Dużo dokładniej niż w dotychczas stosowanych metodach analitycznych. Możliwości symulacyjne metody pozwalają na doskonalenie procedur diagnostycznych takich elementów, a także pozyskiwanie wiedzy specjalistów od diagnostyki.

Metodykę taką można i trzeba doskonalić wraz z rozwojem cyfrowych narzędzi obliczeniowych, jak np. poprzez wprowadzanie automatycznych systemów regulacji parametrów modeli ROM.

Wraz z rozwojem technologii cyfrowych wzrastają możliwości związane ze zdalną diagnostyką urządzeń energetycznych. Wykorzystując nowoczesne systemy informatyczne można zapewnić ciągłą komunikację z systemami kontrolno-rejestrującymi oraz sterowania w elektrowniach. Informacje zebrane w ten sposób mogą być przetwarzane przez systemy dedykowane do diagnostyki, analizy awaryjności czy oceny stanu technicznego urządzeń.

PIŚMIENNICTWO

[1] Trzeszczyński J., *Diagnostyka dziś i jutro*. „Energetyka" 2021 (800), nr 2.

[2] Trzeszczyński J., *Dokąd zmierza diagnostyka?* „Energetyka" 2021, nr 12, *Biuletyn Pro Novum* 2/2021.

[3] Trzeszczyński J., *Wirtualne Środowisko Diagnostyczne*. „Energetyka" 2021, nr 9, *Biuletyn Pro Novum* 1/2021.

[4] Stanek R., Trzeszczyński J., *Prognozowanie trwałości urządzeń energetycznych w trybie zdalnym z wykorzystaniem aplikacji Prognoza PRO®*. „Energetyka" 2021, nr 12, *Biuletyn Pro Novum* 2/2021.

[5] Dragon A., Pośpiech S., Rajca S., *Remonty turbin wspierane przez zaawansowaną diagnostykę*. „Energetyka" 2021, nr 12, *Biuletyn Pro Novum* 2/2021.