

Biuletyn

nr 2/2020

**Zespół redakcyjny: mgr inż. Jerzy Dobosiewicz,
dr inż. Jerzy Trzeszczyński**



System
zarządzania
ISO 9001:2015
ISO 14001:2015
PN-N-18001:2004
www.tuv.com
ID 9108628944



POLSKA
NAGRODA
JAKOŚCI
XXII edycja 2016
LAUREAT
w kategorii:
średnia organizacja
naukowo-techniczna

nr LB-003/09

proNovum[®]
RESEARCH & TECHNOLOGICAL SERVICES
Centrum Badawczo – Rozwojowe

Szanowni Państwo,

W przeciwieństwie do innych dziedzin gospodarki energetyka jak dotąd nie doświadczyła poważnych problemów epidemii wywołanej koronawirusem. „Choroby współistniejące” tej branży nie dały jeszcze znać o sobie. Skutki epidemii, także wśród ludzi, objawiają się w różnym czasie. Media zwracają uwagę także na jej pozytywne rezultaty, zwłaszcza na szanse zwiększenia dynamiki wdrażania „zielonego ładu”. Są już na to gigantyczne, unijne środki finansowe, są dostawcy zielonych, a zwłaszcza mniej emisyjnych technologii. Jest także zapotrzebowanie na energię pomimo osłabienia dynamiki przemysłu. 10 grudnia bieżącego roku w szczycie porannym o godz. 13.15 zapotrzebowanie na moc w krajowej sieci sięgnęło historycznie najwyższego poziomu. Przyczynę wzrostu zapotrzebowania próbuje się tłumaczyć coraz powszechniejszą pracą zdalną oraz datą premiery gry komputerowej „Cyberpunk 2077”.

Polska energetyka większość szans i ... problemów ma ciągle przed sobą. Czekamy na szczegóły i konsekwencje rozdzielania aktywów „brudnych” od „czystych” oraz strategię dla tych pierwszych po 2025 roku. „Dla Polski transformacja w kierunku neutralności emisyjnej nie będzie prosta ani tania. Bez pomocy UE wykonanie tego celu w ciągu 30 lat wydaje się b. trudne i mało realne” (Dieter Helm – Uniwersytet Oxfordzki).

XXII Sympozjum Pro Novum, z którego relację oraz wybrane referaty publikujemy w dalszej części Biuletynu Pro Novum, udało nam się zorganizować bezpiecznie, w trybie bezpośrednim tuż przed ogłoszeniem restrykcji związanych z drugą falą pandemii. Motywem przewodnim była strategia eksploatacji, której źródłem może/powinna być diagnostyka. Tak rozumianą diagnostykę wykonujemy i propagujemy na różne sposoby od prawie 35 lat. Można z łatwością wskazać jej pozytywne skutki, nie tylko w krajowej elektroenergetyce.

Od wielu lat rozwijamy projekty wspierające cyfrowo-zieloną transformację w krajowym systemie elektroenergetycznym zgodnie z filozofią: w końcowym resursie pracy eksploatuj urządzenia i instalacje energetyczne jak najtaniej, ale zawsze bezpiecznie i z akceptowalną dyspozycyjnością. Wykorzystuj zdobytą dotąd wiedzę oraz doświadczenie; dobrze zaplanowanymi badaniami wyłącznie ją uzupełniaj. Stan techniczny oceniaj w sposób zdalny. Jeśli kompetencje inżynierskie, w naturalny sposób, ulegają wyczerpaniu, rozwijaj „kompetencje maszynowe”. Nie tylko Ty się możesz uczyć. Daj szansę algorytmom.

Zapraszamy do lektury Biuletynu Pro Novum, a w Nowym 2021 Roku do współpracy.

Jerzy Trzeszczyński & Jerzy Dobosiewicz

Diagnostyka źródłem wiedzy i strategii eksploatacji

Diagnostics as a source of knowledge and operation strategy

Diagnostyka najczęściej jest źródłem informacji, bywa źródłem wiedzy, a gdy jest odpowiedniej jakości może być wykorzystana do kreowania strategii eksploatacji, utrzymania technicznego i modernizacji. Jakość wiedzy na podstawie diagnostyki zależy od jakości badań, interpretacji ich wyników oraz ocen stanu technicznego i prognoz trwałości. Diagnostykę w *Pro Novum* traktuje się jako system zintegrowany z eksploatacją urządzeń. Jest to interdyscyplinarna dziedzina wiedzy wykorzystująca wyniki badań nieniszczących i niszczących, analizy wytrzymałościowe, a w ostatnim czasie także zaawansowaną analitykę i metody sztucznej inteligencji. Diagnostyka powinna odpowiednio wykorzystywać dotychczasowe doświadczenia, klasyczne, sprawdzone metody badań oraz najnowsze technologie analityczne i informatyczne. Zasady tego rodzaju diagnostyki zostały opracowane i software'owo zaimplementowane w formie Platformy Informatycznej LM System PRO+® firmy *Pro Novum*.

Słowa kluczowe: diagnostyka, system zintegrowany z eksploatacją urządzeń, Platforma Informatyczna LM System PRO+® *Pro Novum*

Diagnostics is most often a source of information, sometimes it is a source of knowledge, and when it is of appropriate quality, it can be used to create a strategy for operation, technical maintenance and modernization. The quality of knowledge on the basis of diagnostics depends on the quality of tests, the interpretation of their results, the assessment and durability forecasts. Diagnostics in *Pro Novum* is treated as a system integrated with the operation of devices. It is an interdisciplinary field of knowledge that uses the results of non-destructive and destructive testing, strength analysis, and recently also advanced analytics and AI methods. Diagnostics should properly use existing experience, classic, proven research methods and the latest analytical and information technologies. The principles of this type of diagnostics have been developed and software implemented in the form of the LM System PRO+® IT Platform by *Pro Novum*.

Keywords: diagnostics, system integrated with operation of equipment, IT Platform LM System PRO+® *Pro Novum*

Diagnostyka najczęściej jest źródłem informacji, bywa źródłem wiedzy, a gdy jest odpowiedniej jakości może być wykorzystana do kreowania strategii eksploatacji, utrzymania technicznego i modernizacji [1,2]. Pozwala uzyskać wiedzę o urządzeniu zbliżoną do wiedzy jego dostawcy, co dla użytkownika urządzenia posiada istotne znaczenie, zwłaszcza wtedy gdy urządzenie eksploatowane jest dłużej niż jego dostawca obecny jest na rynku. Jakość wiedzy na podstawie diagnostyki zależy od jakości badań, interpretacji ich wyników oraz wniosków o charakterze ocen stanu technicznego i prognoz trwałości. Najbardziej zaawansowanej diagnostyce sprzyja możliwość integracji informacji i wiedzy z wielu obiektów tej samej klasy. Złazszcza gdy obejmuje ona także wyniki analizy awaryjności.

Wśród wymagań stawianych blokom energetycznym: prawnych, ekonomicznych i technicznych, te ostatnie są najważniejsze. Stan techniczny urządzeń energetycznych decyduje bowiem o ich bezpieczeństwie i dyspozycyjności. Dla bloków konwencjonalnych, zwłaszcza tych, które w przyszłości będą jeszcze w większym stopniu niż dotąd stabilizować pracę systemu elektroenergetycznego, racjonalnie powiększona elastyczność i wysoka dyspozycyjność będą ich najbardziej pożądanymi cechami. Odnosi się to zwłaszcza do bloków obecnych na Rynku Mocy. Oczekiwania takie może zapewnić na bieżąco aktualizowana wiedza, z odpowiednio zorganizowanej diagnostyki oraz odpowiedniej jakości remonty wykonywane w zakresie adekwatnym do stanu technicznego i oczekiwań produkcyjnych.

Właściwie zorganizowana i profesjonalnie wykonywana diagnostyka umożliwia poznanie konstrukcji i technologii wykonania komponentów urządzeń oraz ich warunki eksploatacji w stopniu zbliżonym do wiedzy dostawcy. Tej jakości wiedza pozwala nie tylko optymalizować zakres i koszty utrzymania technicznego, ale także stwarza warunki dla modernizacji urządzeń w zakresie usuwania błędów konstrukcyjnych, poprawy bezpieczeństwa,

przedłużania trwałości, wydłużania czasu eksploatacji, niskokładowej poprawy elastyczności. Z tych względów diagnostykę „od zawsze” traktowaliśmy w *Pro Novum* jako system zintegrowany z eksploatacją urządzeń [3-5]. Rozwój i potanie technologii informatycznych i cyfrowych, w ostatnim czasie także możliwość kreowania wiedzy z wykorzystaniem Sztucznej Inteligencji sprawiły, że optymalną formą diagnostyki stała się diagnostyka wykonywana w trybie zdalnym, który pozwala na prawie bezobsługową ocenę bieżącego stanu technicznego, prognozowanie trwałości i predykcję awarii, uwzględniając różne warianty przyszłej eksploatacji urządzenia [7-9].

Bloki węglowe w polskim systemie elektroenergetycznym

Polityka neutralności klimatycznej Unii Europejskiej zakłada całkowitą dekarbonizację energetyki w ciągu najbliższych 30-tu lat, oznacza to m.in. rezygnację z budowy nowych bloków spalających węgiel oraz stopniowe wyłączenie z eksploatacji istniejących jednostek wytwórczych, a za nim to nastąpi, ich pracę w nietypowych, coraz trudniejszych warunkach. Dla polskiego systemu elektroenergetycznego to wyjątkowo duże wyzwanie. Bloki konwencjonalne, zwłaszcza spalające węgiel kamienny, pracować będą w coraz bardziej regulacyjnym trybie. Wybudowane w ostatnim czasie bloki na węgiel kamienny i brunatny o dużej mocy, ponad 800 MW, należy traktować jako dodatkowe, potencjalne źródła niestabilności systemu w przypadku ich awarii. Budowane w ostatnim czasie, przez różnych dostawców, prawdopodobnie ostatnie bloki węglowe w Polsce posiadają indywidualną konstrukcję. Będzie to znaczącym utrudnieniem dla ich utrzymania technicznego, zwłaszcza w zakresie zapewnienia kompetencji i optymalizacji kosztów utrzymania technicznego.

Obecnie podstawę naszego systemu elektroenergetycznego stanowią bloki klasy 200 MW i 360 MW. Zastępować je będzie można tylko w dłuższym czasie, po wcześniejszym zaplanowaniu dla nich racjonalnej alternatywy. Czas eksploatacji bloków na ogół nie ma związku z czasem pracy ich głównych i pomocniczych urządzeń oraz ważnych węzłów konstrukcyjnych i elementów, były bowiem wielokrotnie modernizowane. Ich aktualny stan techniczny sprawia, że spełniają wymagania: dyrektywy IED 2010/75/EU, Operatora oraz Urzędu Dozoru Technicznego, a większość z nich spełni wymagania BAT Conclusions, które zaczęły obowiązywać od lipca 2021 roku. Ich dyspozycyjność oraz koszty utrzymania są na akceptowalnym poziomie. Te z nich, które znajdują się na Rynku Mocy powinny być rentowne, o ile pod względem stanu technicznego zostały dobrze przygotowane, a wystarczająco wysokich kompetencji w zakresie eksploatacji i utrzymania technicznego nie braknie do 2025 roku [10-12].

Liczne modernizacje sprawiły, że w ostatnim okresie eksploatacji bloków należy liczyć się w większym stopniu z uszkodzeniami typowymi dla pierwszego okresu eksploatacji, czyli błędami projektowymi, błędami wykonania i montażu ich zmodernizowanych części niż z wyczerpaniem trwałości elementów krytycznych (grubościennych). Bloki te, w tym także klasy 200 MW przeszły cykl modernizacji związany z poprawą sprawności, ograniczeniem emisji, zwłaszcza NO_x , SO_x i pyłu oraz wydłużeniem trwałości, zwłaszcza stalowych elementów turbin oraz ru-

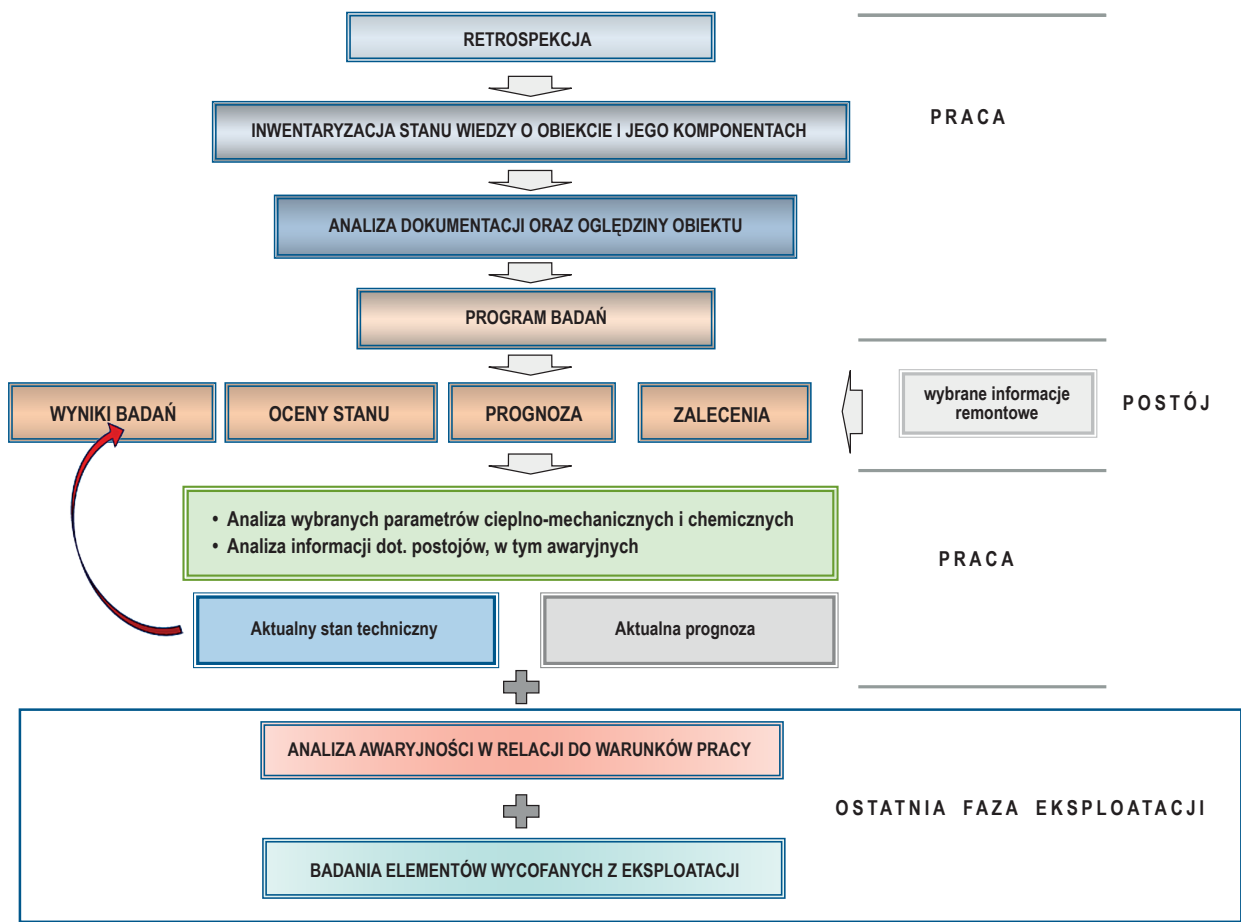
rociągów parowych i wodnych. Te z nich, które przeszły ten proces w pełnym zakresie zwiększyły swoją sprawność do ok. 38%. Taką sprawność, w przybliżeniu, wykazują nowoczesne węglowe bloki nadkrytyczne, które pracują w trybie regulacyjnym.

Ważnym atutem, zwłaszcza bloków klasy 200 MW, jest ich konstrukcja, umożliwiająca przedłużanie trwałości głównych elementów grubościennych (krytycznych) znacznie poza czas projektowy przy zastosowaniu regeneracji i rewitalizacji oraz poprzez usunięcie błędów konstrukcyjnych i montażowych, jeśli remontom, także odtworzeniowym udaje się zapewnić odpowiednio wysoką jakość. Wiedza z zaawansowanej diagnostyki stwarza także nadzieję na niskokosztową poprawę elastyczności, zwłaszcza bloków klasy 200 MW [17-19].

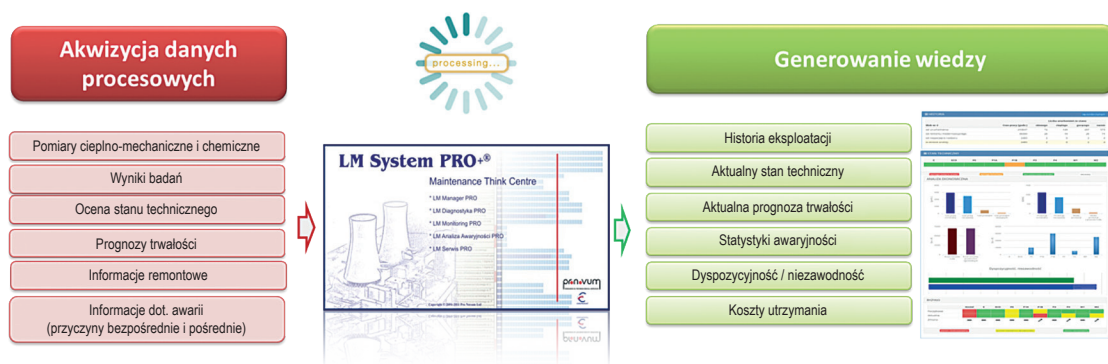
Diagnostyka jako system zintegrowany z eksploatacją urządzenia

Konstrukcja, w tym zastosowane materiały, technologia wykonania i parametry pracy urządzenia determinują metodykę diagnostyki. Oznacza to, że modernizacje wymagają jej rewizji — im głębsze, tym w większym stopniu.

Badania i pomiary to tylko część diagnostyki. Ocena stanu technicznego, prognoza trwałości oraz zalecenia remontowe i eksploatacyjne ujęte w odpowiednio zorganizowany system



Rys. 1. System diagnostyczny działający zdalnie jako proces zintegrowany z eksploatacją, z uwzględnieniem odrębnego podejścia do bezpieczeństwa i dyspozycyjności w jej końcowej fazie



Rys. 2. Zdalna diagnostyka w formie wieloletniego serwisu LM Serwis PRO+®, zapewniająca automatyczną aktualizację oceny stanu technicznego i prognozy trwałości; zrealizowana na Platformie LM System PRO+®

składają się na diagnostykę, interdyscyplinarną dziedzinę wiedzy wykorzystującą wyniki badań nieniszczących i niszczących, analizy wytrzymałościowe, a w ostatnim czasie także zaawansowaną analitykę i metody sztucznej inteligencji. Jeśli informacje i wiedza z diagnostyki są odpowiednio uporządkowane, to optymalny harmonogram, tj. terminy i zakresy badań powstają na podstawie retrospekcji. Ważną częścią diagnostyki powinna być analiza awaryjności. Można spotkać się z opinią, że to najważniejsza część diagnostyki. Dostarcza najbardziej wartościowej wiedzy, bo pozwala na eliminowanie także pośrednich przyczyn awarii, czyli wpływa na przedłużenie cykli międzyremontowych oraz redukcję zakresów badań.

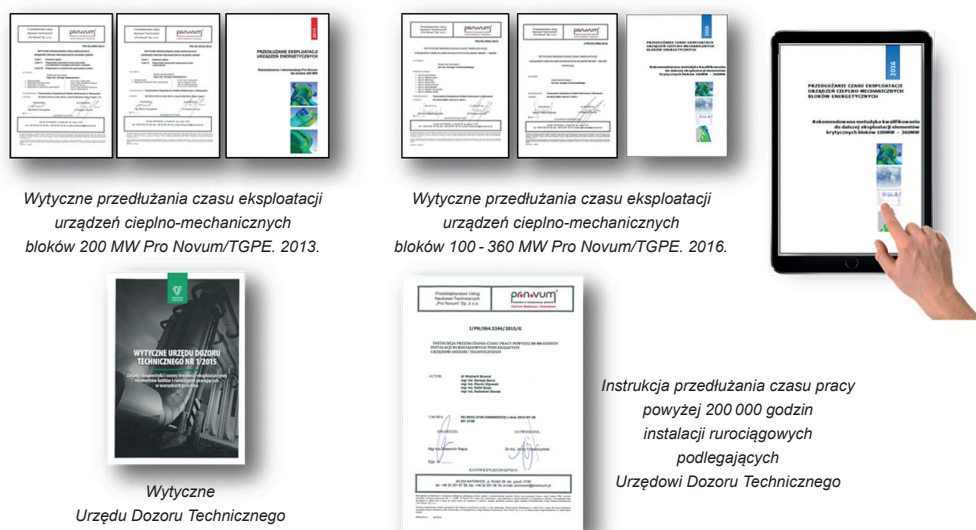
Jeśli wyżej opisany system zintegrować z eksploatacją bloku/urządzenia (rys. 1) w taki sposób, aby w trybie on-line analizować warunki eksploatacji i ich wpływ na obecność i intensywność zjawisk niszczących, to już tylko krok od implementacji zdalnej diagnostyki w formie bezobsługowych serwisów diagnostycznych (rys. 2).

Aplikacja informatyczna realizująca zdalną diagnostykę stała się źródłem inspiracji dla opracowania wielu specjalistycznych

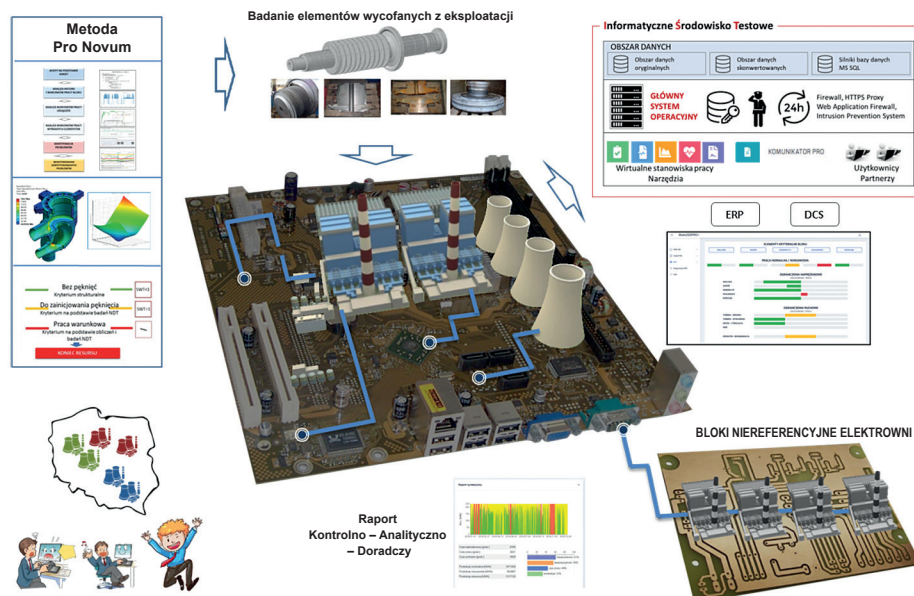
modułów, które pozwalają zarówno na autonomiczną realizację jej poszczególnych funkcji, np. analizy historii i warunków eksploatacji, jak również poszerzają jej możliwości o dodatkowe analizy awaryjności, dyspozycyjności, niezawodności, planowania diagnostyki i remontów, etc. W ten sposób powstała Platforma Informatyczna LM System PRO+®. Najczęściej wykorzystywany jest jeden z jej modułów LM Serwis PRO+® wdrożony na wielu urządzeniach i blokach o mocy od 50 MW do 858 MW. W ostatnim czasie program jest rozwijany z wykorzystaniem technologii Digital Twins oraz wybranych metod AI, w tym zwłaszcza machine learning (rys. 6). LM System PRO+® to zaimplementowane w formie software'u „Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepło-mechanicznych bloków 100-360 MW” [6], [13-16] (rys. 3).

Zdalna diagnostyka w Polsce posiada prawie piętnastoletnią historię [8]. Przed nią możliwa co najmniej tak samo długa przyszłość, zarówno na blokach nowych jak i długo eksploatowanych w końcowej fazie ich resursu.

Trudno jednoznacznie wyjaśnić, dlaczego ta atrakcyjna pod każdym względem forma wykonywania diagnostyki nie tylko nie stała się obowiązującym standardem, ale wydaje się, że wtedy



Rys. 3. Standaryzacja oceny stanu technicznego bloków 100-360 MW, w tym bloków klasy 200 MW oraz przykład integracji „Wytycznych...” Pro Novum oraz „Wytycznych...” UDT w formie Instrukcji przedłużania czasu pracy instalacji rurociągowych



Rys. 4. System diagnostyczny w skali bloków energetycznych jednej klasy, z wykorzystaniem portalu internetowego integrującego informacje i wiedzę z diagnostyki i analizy eksploatacji

gdy może w największym stopniu zademonstrować swoje atuty oraz gdy ma szansę na wykorzystanie zaawansowanej analityki oraz metod AI, znajduje się w regresie, tam gdzie została wdrożona. Zdalne systemy diagnostyczne o charakterze interwencyjnym zapewniające tanie i bezpieczne rozwiązywanie poważnych problemów remontowo-eksploatacyjnych, także wykorzystywane są w zakresie nieadekwatnym do potrzeb. Można wskazać na wiele barier i ich wzajemną interakcję, poczynając od braku od wielu lat strategii dla polskiej energetyki, która przekłada się na jej finansową kondycję oraz coraz bardziej uproszczone podejście do utrzymania stanu technicznego majątku produkcyjnego.

System diagnostyczny można zorganizować nie tylko w skali jednej elektrowni czy jednej grupy elektrowni. Największe korzyści może przynieść w skali bloków jednej klasy, wtedy może być źródłem zaawansowanej strategii eksploatacji (wyłączania z eksploatacji), co w końcowej fazie pracy bloków klasy 200 MW oraz koncepcji rozdzielania aktywów wysoko- i niskoemisyjnych może mieć istotne znaczenie (rys. 4).

Diagnostyka jako źródło strategii przedłużania trwałości

Okresowe badania i oceny stanu technicznego elementów krytycznych, zwłaszcza bloków klasy 200 MW, wskazują, że prawie wszystkie uszkodzenia elementów krytycznych/grubościenne mają charakter ciepło-zmęczeniowy. Degradacje o charakterze pełzaniowym były dotąd sporadyczne, a ich źródłem były dodatkowe naprężenia wywołane błędami konstrukcyjnymi, montażowymi, remontowymi oraz eksploatacyjnymi. Potwierdziły to w pełni badania niszczące elementów (wirniki WP i SP, kadłuby i komory zaworowe WP i SP oraz kolana rurociągów pary pierwotnej i wtórnie przegrzanej) z bloków wycofanych z eksploatacji po przekroczeniu 250 tys. godzin pracy, jak rów-

nież wyniki bieżących badań niszczących tych elementów oraz walczaków i komór przegrzewaczy pary, wykonywane na próbkach trepanacyjnych.

Dla elementów stalowych opracowano technologię rewitalizacji, polegającą na naprawie przez spawanie ubytków po usuniętych uszkodzeniach o charakterze pęknięć eksploatacyjnych połączonych z obróbką cieplną, regeneracją struktury oraz usuwaniem niedopuszczalnych deformacji (kadłuby WP i SP) na drodze termicznej oraz obróbki mechanicznej. Najwcześniej zrewitalizowane w ten sposób stalowe elementy turbin eksploatowane są bezawaryjnie ok. 150 tys. godzin licząc od daty wykonania tego procesu. Regeneracja struktury poprawiła plastyczność materiału przez co elementy stały się bardziej odporne na cykliczne naprężenia termomechaniczne, zarówno na etapie inicjacji pęknięć jak i ich propagacji [12].

Odpowiednio wykonywana diagnostyka pozwoliła zidentyfikować nieoptymalne rozwiązania zamocowań rurociągów parowych i wodnych, niektóre błędy konstrukcyjne walczaków oraz wirników (np. kształt otworów i rowków cieplnych). Wykonane na tej podstawie modernizacje wyeliminowały trwale uszkodzenia instalacji rurociągowych. Czas pracy najwcześniej zmodernizowanych w ten sposób instalacji rurociągowych przekroczył 300 tys. godzin.

Ważnym źródłem wydłużania trwałości jest analiza awaryjności wykonywana w sposób pozwalający na ustalenie nie tylko przyczyny bezpośredniej awarii/uszkodzenia, ale także przyczyny pośredniej. Złazszcza ustalenie przyczyny pośredniej przynosi korzyść polegającą na wyeliminowaniu lub znaczącej redukcji ryzyka kolejnych awarii. Dla monitorowania ryzyka awarii w trybie on-line systemy zdalnego monitorowania stanu technicznego głównych urządzeń ciepło-mechanicznych bloków w formie Platformy Informatycznej LM System PRO+® wyposażano w moduł analizy ryzyka, który klasycznie rozumiane ryzyko awarii jako iloczyn jej prawdopodobieństwa i konsekwencji

aktualizuje w trybie on-line, uzależniając bieżącą wartość ryzyka m.in. od warunków eksploatacji i jakości utrzymania technicznego, a konsekwencje awarii uzależnia do kosztów usuwania jej skutków i wartości utraty produkcji. W ten sposób monitorowano w trybie on-line ryzyko awarii powierzchni ogrzewalnych kotłów OP-650 i BP-1150. Usługa wykonywana w trybie SaaS (Software as a Service) – nie wymagała zakupu programu ani licencji.

Wyczerpanie trwałości w ostatniej fazie eksploatacji bloku

Wyniki dotychczasowych badań elementów krytycznych urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków klasy 200 MW oraz ich awaryjności i analiz obliczeniowych wskazują, że horyzont bezpiecznej eksploatacji może wynieść ok 350 000 godzin. Dla niektórych elementów, zwłaszcza kotła czas do wymiany lub naprawy może być krótszy, jeśli blok będzie pracował w intensywniej regulacji, a zwłaszcza gdy będzie często uruchamiany i odstawiany oraz będzie miał większą liczbę dłuższych postojów.

Sądząc po opublikowanych wynikach badań oraz własnych, dotychczas nie wykryto uszkodzeń o charakterze pełzaniowym wymagających wymiany elementów, wyłączając przypadki uszkodzeń wywołanych błędami eksploatacji oraz wadami technologicznymi powstałymi podczas nieprawidłowo wykonanej naprawy.

Liczne modernizacje sprawiły, że w ostatnim okresie eksploatacji należy liczyć się w większym stopniu z uszkodzeniami typowymi dla pierwszego okresu ich pracy, czyli z błędami projektowymi oraz błędami wykonania i montażu. Systemy diagnostyczne powinny to uwzględniać monitorując warunki pracy oraz analizując wyniki badań i ważne dla oceny stanu technicznego informacje remontowe [1].

Zasady tego rodzaju diagnostyki zostały opracowane (rys. 1) [14-16] i software'owo zaimplementowane w formie Platformy Informatycznej LM System PRO+® [17]. Uwzględniono zarówno problematykę pracy regulacyjnej jak i chemii energetycznej (podczas regulacyjnej pracy bloków oraz częstych postojów).

Kompetencje techniczne i jakość utrzymania stanu technicznego

Wiele obserwacji dokonywanych w ostatnim okresie wskazuje, że wraz ze starzeniem się bloków energetycznych w naturalny sposób ubywa specjalistów o najwyższych kwalifikacjach. Jednocześnie trwająca od lat redukcja nakładów na utrzymanie stanu technicznego urządzeń połączona z wyborem wykonawcy remontu, modernizacji, diagnostyki według najniższej ceny sprawiają, że stan techniczny urządzeń będzie się pogarszał (już się pogarsza) szybciej niż wynika to z wpływu warunków eksploatacji, nawet tych nietypowych, jak praca regulacyjna.

Doświadczenia z bloków wyłączonych z eksploatacji lub będących w trakcie wyczerpania limitów derogacji wskazują, że profilaktykę zastępuje działanie interwencyjne. Kryterium badania/naprawy staje się najczęściej cena.

Uwzględniając możliwą do wyobrażenia przyszłą sytuację w energetyce trzeba zaznaczyć, że realizacja, strategii remontów „awaryjno-planowych” może okazać się skomplikowana. Atrak-

cyjność bloku dla Operatora i Inwestora będzie uzależniona od odpowiedniej elastyczności i wysokiej dyspozycyjności. Tych cech bloku nie da się zapewnić redukując w prosty sposób nakłady na utrzymanie stanu technicznego, bez uwzględnienia konsekwencji po stronie kompetencji personelu i jakości usług.

Diagnostyka wspierana przez wymianę wiedzy i doświadczeń

Doświadczenia eksploatacyjne Użytkowników urządzeń jednego typu lub bardzo do siebie podobnych posiadają najwyższy status, umożliwiając bowiem zarówno identyfikację najistotniejszych problemów, jak również udostępniają sprawdzone sposoby ich rozwiązywania.

Skojarzenie wyników badań wykonywanych w remontach planowych, awaryjnych oraz wyników analizy warunków eksploatacji i dyspozycyjności pozwala uzyskać zaawansowaną wiedzę do planowania zakresów diagnostyki, remontów oraz nakładów na utrzymanie stanu technicznego [9-11].

W tym celu opracowano standardy badania, system zdalnej diagnostyki oraz portal internetowy integrujący informacje, wiedzę i doświadczenia wielu użytkowników tej samej klasy urządzeń.

Portal internetowy to miejsce kreowania wspólnej wiedzy w skali użytkowników jednej klasy urządzeń energetycznych (rys. 4) [7]. Bloki 200 MW w dającej się przewidzieć przyszłości pozostaną ważną częścią systemu elektroenergetycznego [19]. Portal integruje diagnostykę postojową i eksploatacyjną/zdalną w sposób pozwalający na bieżącą aktualizację oceny stanu technicznego urządzeń ciepłno-mechanicznych oraz weryfikację prognozy ich trwałości. Może pełnić funkcję silnego narzędzia wspierającego pracę inżynierów zajmujących się utrzymaniem stanu technicznego w warunkach ciągłej transformacji energetyki, która m.in. oznacza eksploatację bloków konwencjonalnych w coraz mniej typowych dla nich warunkach [4, 5].

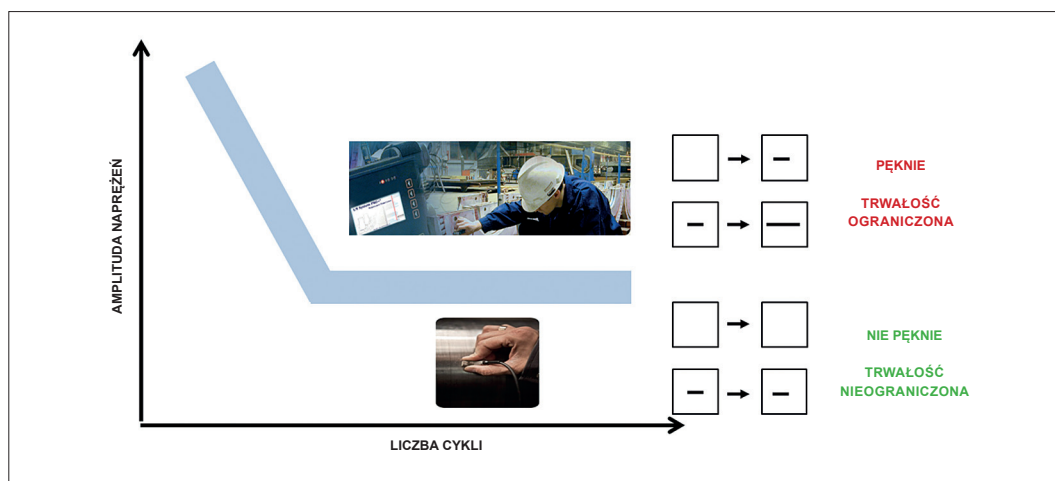
Portal komunikuje się z Użytkownikami w trybie serwisu internetowego przy zachowaniu wszystkich koniecznych rygorów bezpieczeństwa. Dotyczy to zarówno raportów adresowanych do indywidualnych użytkowników, jak również raportów wspólnych.

Korzyści z wymiany wiedzy i doświadczeń

Diagnostyka wykonywana w wyżej opisany, systemowy sposób, na długo eksploatowanych blokach stworzyła warunki do uzyskania wiedzy i kompetencji, które często stanowią większą wartość niż kolejne badania, zwłaszcza o „przesiewowym” charakterze. Stwarzają one warunki do szybkiego rozwiązywania problemów, zamiast do ich kreowania, a prawie zawsze do uniknięcia zbytecznych kosztów.

W praktyce często, z różnych powodów, elementy urządzeń, a nawet niektóre ich węzły konstrukcyjne posiadają wady wykonania i/lub błędy projektowe, które ujawniane są po wielu latach eksploatacji. Takie sytuacje zostały dawno opisane i zinterpretowane.

Historia, nie tylko polskiej energetyki, jest pełna przykładów, gdy wady technologiczne (np. niektórych wytopów stali, spoin, odlewów stalowych) identyfikowane były i nadal się je wykrywa



Rys. 5. Wada wykonania jako nielimitujące czasu eksploatacji „uszkodzenie” niewymagające wymiany/naprawy elementu (kolor zielony)

w różnych fazach eksploatacji urządzeń, niekiedy od ich pierwszego uruchomienia i śledzi się (śledziło) ich zachowanie w okresie eksploatacji aż do ich wyłączenia, bez negatywnych konsekwencji dla bezpieczeństwa i dyspozycyjności urządzenia.

Na rysunku 5 wyjaśniono dlaczego nie należy obawiać się wad, którym po wielu latach pracy urządzenia nie towarzyszą wskazania o charakterze pęknięć. Oznacza to, że w danej lokalizacji wada o określonej geometrii znajduje się w zakresie nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Rzeczywista amplituda naprężeń jest zbyt mała, aby w materiale o określonych właściwościach mogło być zainicjowane wskazanie o charakterze eksploatacyjnym. Jej naprawa może zapewnić to samo albo pogorszyć sytuację prowadząc w każdym przypadku do poniesienia dodatkowych kosztów.

Stopień wyczerpania trwałości można określać obliczeniowo oraz na podstawie badań. Często usiłuje się to robić w sposób bardzo skomplikowany. Jeśli zależność między masą a energią można wyrazić przy pomocy prostego wzoru, tym bardziej można prosto określić zależność pomiędzy wynikiem badania a jego inżynierskimi konsekwencjami. Wieloletnia praktyka pokazuje, że im bardziej skomplikowana interpretacja wyników badań, tym mniej przydatny dla praktyki eksploatacyjnej rezultat. Z filozofii pochodzi postulat, który dobrze wspiera takie myślenie: „Jeśli czegoś nie potrafisz wyrazić prosto, to zaniechaj tego”.

Lista problemów, jakim muszą sprostać w przyszłości polskie elektrownie jest na tyle duża, że warto byłoby jej nie powiększać przez problemy, które albo zostały już kiedyś rozwiązane, albo rozwiązywane były w ostatnim czasie szybko, tanio i skutecznie, zwłaszcza że rozwiązania te nie tylko nie obniżają bezpieczeństwa, ale je w sposób oczywisty poprawiają.

W wielu publikacjach przewijają się pomysły o zwiększeniu liczby badań zwłaszcza w kierunku poszukiwania pierwszych oznak degradacji struktury, wykorzystania badań innowacyjnych, zaawansowanych technik analitycznych, predykcji oraz sztucznej inteligencji. Część tych pomysłów ma ograniczoną przydatność m.in. dlatego, że brak im solidnej praktycznej weryfikacji.

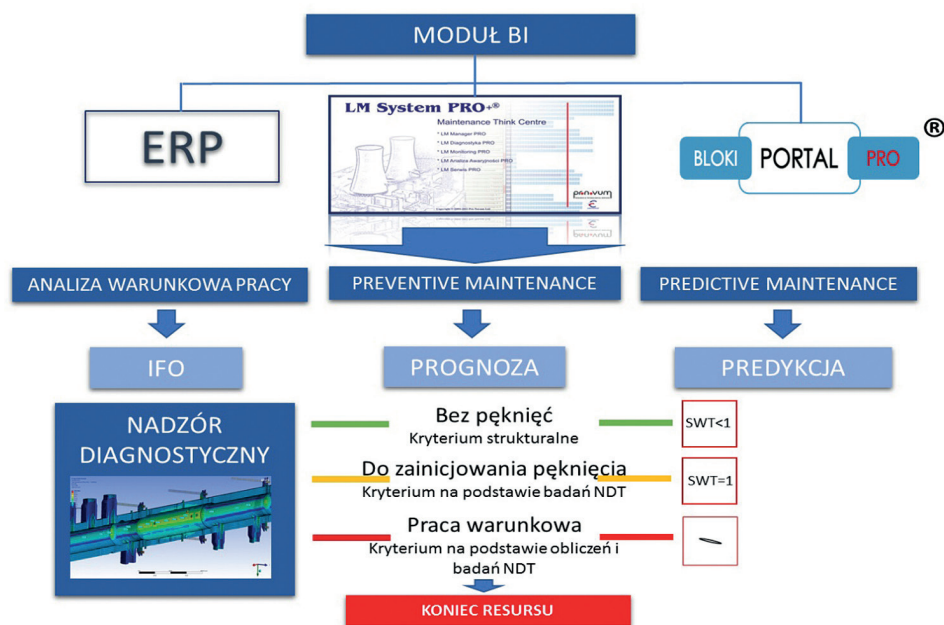
Zwiększanie liczby badań, np. metalograficznych, często nie ma sensu, bo procesy degradacyjne, jeśli w ogóle można je stwierdzić z istotną dla praktyki pewnością, przebiegają powoli

nawet dla elementów eksploatowanych powyżej temperatury granicznej. Nawet najdłużej eksploatowane w przyszłości bloki nie przepracują więcej niż ok. 70 tys. godzin. W tym czasie z inżynierskiego punktu widzenia wystarczy wykonać jedno badanie przyjmując, że w przeszłości także było wykonywane, a w wielu przypadkach także towarzyszyło im pobieranie wycinków do badań. Liczba badań nie przechodzi automatycznie w użyteczną wiedzę. Można wskazać konkretne przypadki, gdy olbrzymia, idąca w tysiące (na jednym bloku) ilość zbadanych miejsc metodą replik nie miała istotnego znaczenia dla wykrycia rzeczywistych, poważnych problemów dotyczących możliwości dalszej pracy elementów eksploatowanych powyżej temperatury granicznej.

Tzw. zaawansowane metody analityczne oraz próby zastosowania sztucznej inteligencji na obszarze polskiej energetyki w diagnostyce nie dokonały jak dotąd postępu w zakresie kreowania wiedzy, której nie można by zdobyć tradycyjnymi metodami. Jest to jednak obiecujące, potencjalnie atrakcyjne podejście do szybkiej analizy dużych zbiorów danych i informacji. Najbardziej brakuje integracji dobrze sformułowanych wymagań inżynierskich i odpowiednich kompetencji analityka.

W ostatnie fazy eksploatacji będziemy mieli, już mamy, do czynienia przede wszystkim z uszkodzeniami o charakterze zmęczeniowym. Identyfikację miejsc ich występowania można wykonywać przy pomocy badań NDT, ale także analitycznie, tj. analizując w odpowiedni sposób pracę bloku, urządzenia i elementu. Pierwsze wdrożenia takiego postępowania wskazują, że jest ono przydatne zwłaszcza wtedy, gdy uszkodzonego zmęczeniowo elementu nie można naprawić lub wymienić w czasie uwzględniającym harmonogram remontu i interes produkcyjny inwestora. Podejście to powinno być zastosowane także wtedy, gdy zamierzamy wykorzystać zapas trwałości elementu nie tylko do zainicjowania pęknięcia, ale także po jego powstaniu, przy zapewnieniu odpowiedniej kontroli (wykorzystanie metod i kryteriów mechaniki pęknięcia) w okresie jego wzrostu do osiągnięcia rozmiarów zagrażających bezpieczeństwu konstrukcji [6] (rys. 6).

Warunkowe dopuszczanie elementów do dalszej eksploatacji jest znane tak długo, jak istnieje polska energetyka. Dotąd robiło się to (i nadal niestety robi) na podstawie doświadczenia (którego szybko ubywa) i inżynierskiej „intuicji”.



Rys. 6. Wykorzystanie zapasu trwałości elementów krytycznych bloku w zależności od trybu, warunków i strategii jego eksploatacji

Zaprezentowane na rysunku 6 podejście jest działaniem radykalnie zwiększającym bezpieczeństwo.

Regulacyjna praca znacznej części bloków energetycznych sprawia, że zmęczenie w większym stopniu niż pełzanie prowadzi do uszkodzeń wielu ich komponentów. Pęknięcia powinny być możliwie dokładnie zlokalizowane i zwymiarowane (długość, głębokość), co zwykle udaje się zapewnić integrując odpowiednio wyniki badań endoskopowych i ultradźwiękowych. Naprawa pęknięć zlokalizowanych na wewnętrznych powierzchniach elementów na ogół jest technicznie niemożliwa oraz organizacyjnie (długi czas prefabrykacji nowych elementów) i ekonomicznie (zwłaszcza w ostatniej fazie resursu elementów lub/i urządzeń) nieuzasadniona. Dla przypadków, gdy pęknięcia mają charakter zmęczeniowy opracowano metodykę warunkowej eksploatacji uszkodzonych elementów. Ich ocenę stanu technicznego wykonuje się na podstawie normy BS 7910 – 2013+A1:2015 [6]. Jeśli element może być dopuszczony do dalszej eksploatacji, obliczeniowo, w trybie on-line, monitoruje się głębokość pęknięć oraz gdy to jest konieczne, okresowo sprawdza się rozmiary pęknięć dobierając, odpowiednio dla konkretnego przypadku, metody NDT.

W celu zaimplementowania wyżej opisanej metodyki należy zweryfikować istniejący układ czujników: temperatur i ciśnienia pary oraz temperatur metalu pod kątem przydatności do wykonywania obliczeń o wymaganej jakości. Jeżeli układ pomiarowy nie spełnia wymagań należy zabudować dodatkowe czujniki optymalizując ich lokalizację ze względu na dokładność bieżącej analizy ich wyłączenia.

Ocenie stanu technicznego uszkodzonych elementów powinna towarzyszyć symulacja różnych warunków ich pracy z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Jako kryterium bezpieczeństwa należy przyjmować krytyczne rozmiary pęknięć oraz akceptowalny zapas nośności granicznej. Właściwości materiałowe najlepiej przyjmować na podstawie badań elementów wycofanych z eksploatacji [13].

Prefabrykacja nowych elementów narażonych na zmęczenie cieplno-mechaniczne powinna uwzględniać wykonanie dodatkowych pomiarów zapewniających możliwość prowadzenia obliczeń wyczerpania trwałości od zmęczenia w możliwie najdokładniejszy sposób.

Do monitorowania warunkowej eksploatacji elementów wykorzystuje się moduł pomiarowo-analityczny Platformy Informatycznej LM System PRO+® [3, 17]. W zależności od wyników bieżącej analizy stanu technicznego elementów podejmowane są decyzje dotyczące możliwości dalszej bezpiecznej ich eksploatacji, w tym wykonania kontrolnych badań NDT w odpowiednim zakresie.

Po zakończeniu nadzoru diagnostycznego zakończonego wymianą elementów lub zakończenia ich resursu zaleca się wykonanie badań niszczących w zakresie pozwalającym na określenie charakteru uszkodzenia oraz rzeczywistych rozmiarów pęknięć w różnych fazach warunkowej eksploatacji.

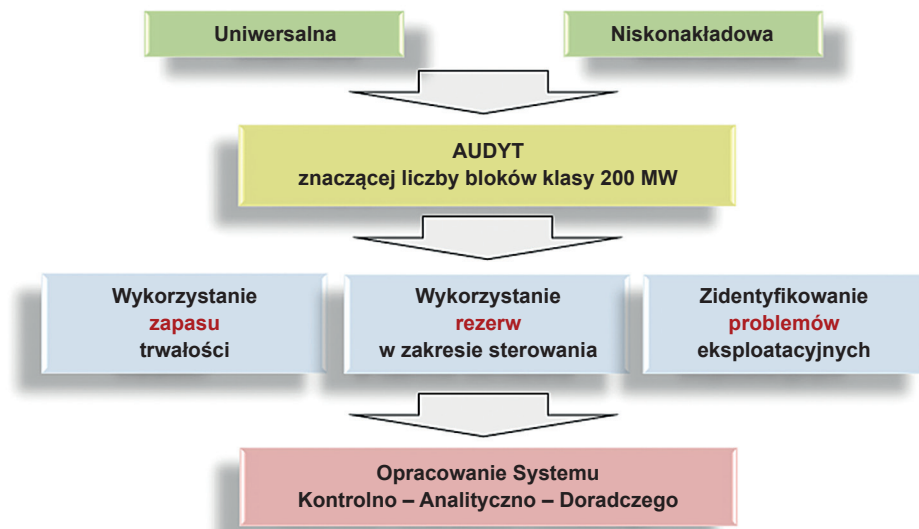
Na rysunku 6 przedstawiono schemat procesu nadzoru diagnostycznego elementu narażonego na uszkodzenia o charakterze termozmęczeniowym.

Diagnostyka źródłem wiedzy dla poprawy elastyczności

Bloki konwencjonalne wkroczyły w ostatnią fazę eksploatacji. W zależności od aktualnego stanu technicznego i stopnia spełnienia obecnych i dających się przewidzieć wymagań prawnych, zwłaszcza dotyczących poziomu emisji, horyzont ich dalszej eksploatacji może wynieść od kilku do kilkunastu lat [18].

Jednym z istotnych ograniczeń może okazać się spełnienie wymagań operatora w zakresie elastyczności. Jej radykalna poprawa może okazać się niemożliwa ze względu na niektóre cechy konstrukcyjne bloków węglowych projektowanych 30-40 lat

Metoda Pro Novum



Rys. 7. Schemat postępowania umożliwiający poprawę elastyczności bloków klasy 200 MW z wykorzystaniem wiedzy z diagnostyki na etapie implementacji metody oraz nadzoru bardziej regulacyjnej eksploatacji

temu. Nieakceptowalne mogą okazać się także koszty niektórych, daleko idących modernizacji.

Także w tym przypadku wiedza z wcześniej wykonywanej diagnostyki oraz towarzyszącej eksploatacji bloku o poprawionej elastyczności może okazać się przydatna. Dobra znajomość aktualnego stanu technicznego bloku i możliwość jego selektywnej poprawy oraz identyfikacja zapasów trwałości krytycznych/grubościennych elementów i możliwość ich pełnego, bezpiecznego wykorzystania stwarzają podstawę do opracowania niskonakładowej poprawy elastyczności, której koncepcję przedstawiono na rysunku 7.

Przez poprawę elastyczności rozumie się przede wszystkim przyspieszenie uruchomień z poszczególnych stanów cieplnych oraz obniżenie minimum technicznego. Audyty techniczne bloków oraz testy pokazują, że elementy krytyczne/grubościenne kotłów i turbozespołów dysponują znacznymi zapasami trwałości, które można bezpiecznie wykorzystać nawet znacząco przyspieszając ich nagrzewanie. Większe problemy przysparzają na ogół ograniczenia ruchowe: wydłużenia względne w układach przepływowych turbin, a przy pracy z obniżonym minimum technicznym stabilność spalania przy pracy na paliwie podstawowym, zachowanie bezpiecznej cyrkulacji czynnika w komorze paleniskowej kotła oraz parametry pary na wylocie z kotła i na ostatnich stopniach części NP turbiny. Diagnostyka w tych przypadkach powinna umożliwiać poprawną i szybką ocenę skutków bardziej wyętej pracy elementów/węzłów konstrukcyjnych narażonych na warunki sprzyjające uszkodzeniom.

Podsumowanie i wnioski

Ostatnia faza eksploatacji bloków energetycznych to także nowe wyzwanie w zakresie zdobywania użytecznej wiedzy o bieżącym stanie technicznym urządzeń oraz istotnych zagro-

żeniach. Zwiększanie zakresów badań nie zawsze będzie możliwe i przydatne. Ilość informacji nie przechodzi automatycznie w praktycznie użyteczną wiedzę. Przynosząca konkretne korzyści diagnostyka powinna odpowiednio wykorzystywać dotychczasowe doświadczenia, klasyczne, sprawdzone metody badań i najnowsze technologie analityczne i informatyczne. Odpowiednio zorganizowana i wykonywana analiza awaryjności w skali bloków energetycznej jednej klasy oraz analiza wyników badań elementów wycofanych z eksploatacji powinny stanowić podstawę systemu diagnostycznego.

Odpowiednio zmodernizowane bloki klasy 200 MW i 360 MW mogą okazać się bezpieczne w eksploatacji i dyspozycyjne w kolejnym horyzoncie czasowym wspierając stopniową transformację polskiego systemu elektroenergetycznego zgodnie ze scenariuszem europejskiego Green Deal'u.

Znaczący udział w możliwości zrealizowania takiej strategii, zwłaszcza w przypadku bloków klasy 200 MW, ma diagnostyka traktowana jako źródło zaawansowanej wiedzy o stanie technicznym, która stworzyła warunki dla niskonakładowego przedłużania eksploatacji poprzez:

- wydłużenie trwałości krytycznych/grubościennych elementów głównych urządzeń ciepłno-mechanicznych, znacznie powyżej trwałości projektowej,
- niskonakładową poprawę ich elastyczności.

W ostatniej fazie eksploatacji bloków konwencjonalnych diagnostyka w stopniu większym niż dotąd powinna korzystać z wieloletnich doświadczeń oraz wiedzy, które nadal powinny być systemowo rozwijane. Ograniczone możliwości korzystania z dotychczasowych doświadczeń i utrata kompetencji technicznych personelu mogą okazać się większym zagrożeniem niż utrata trwałości komponentów bloków energetycznych.

Aby takie zagrożenie istotnie ograniczyć, diagnostykę należy zorganizować i wykonywać w niżej opisany sposób:

- traktować ją jako proces odpowiednio zintegrowany z eksploatacją, postój bloku należy traktować jako jego istotną część;
- wykonywać ją w zdalnym trybie, stan techniczny najważniejszych komponentów bloku powinien być znany w trybie on-line;
- wspierać ją analizą awaryjności, skojarzoną z analizą warunków pracy i kosztami maintenance'u;
- wynikiem badań elementów wycofywanych z eksploatacji należy zapewnić wysoki status;
- zapewnić transfer informacji, wiedzy i doświadczeń z wielu obiektów tej samej klasy wspierając go wybranymi metodami AI;
- korzystać w większym niż dotąd stopniu z metodyki i kryteriów mechaniki pęknięcia, stwarzających możliwość wykorzystania zapasu trwałości elementów posiadających nieciągłości materiałowe o charakterze pęknięć termo-mechanicznych, gdy z przyczyn ekonomicznych naprawa/wymiana jest nieakceptowalna.

Diagnostyka wyposażona w więcej niż dotąd funkcji nie musi być bardziej pracochłonna i droższa niż dotąd stosowana. Odpowiednio zorganizowana i zaimplementowana może być bezobsługowa, zwłaszcza w obszarze raportowania aktualnej wiedzy i wytycznych do strategii eksploatacji.

PIŚMIENICTWO

- [1] Trzeczyski J., Trzeczyska E., *Diagnostic as a source of knowledge and strategy for units of coal flexible fired power plants*. VGB Conference „Maintenance in Power Plants 2019”. 19-20 February 2019. Potsdam/Germany.
- [2] Trzeczyski J., Trzeczyska E., *Diagnostic as a source of knowledge and strategy for units of coal flexible fired power plants*. “VGB PowerTech” 2020, No 9.
- [3] Trzeczyski J., *Concept and Present State of Implementation of LM System PRO® – the System Supporting Maintenance of Thermo-Mechanical Power Equipment*. 3rd ETC Generation and Technology Workshop “Life Time Management of Pressurized Equipment”, Dublin 2007.
- [4] Trzeczyski J., Stanek R., Szyja R., Staszatek K., *Cyclic operation of modernized power units of 200 MW and 360 MW*. ETD Conference – Flexible Operation & Preservation of Power Plants. London, 23-24 November 2015.
- [5] Trzeczyski J., Stanek R., Rajca S., Staszatek K., Sobczyszyn A., *Diagnostics of Long Time Operated Power Units Planned for Flexible Operation*. VGB Workshop „Materials and Quality Assurance”. 18-19 May 2017 in Maria Enzersdorf/Austria.
- [6] BS 7910 – 2013+A1:2015: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.

- [7] Stanek R., Trzeczyski J., Dąbrowski M., *Diagnostyka jednego typu urządzeń w skali KSE z wykorzystaniem portalu internetowego integrującego informacje eksploatacyjne*. „Energetyka” 2017, nr 12, *Biuletyn Pro Novum* 2/2017.
- [8] Trzeczyski J., Murzynowski W., Stanek R., Merdalski W., *Zdalna diagnostyka – niewykorzystana szansa na niskonakładowe zapewnienie bezpieczeństwa*. „Energetyka” 2020, nr 6, *Biuletyn Pro Novum* 1/2020.
- [9] Trzeczyski J., *Diagnostyka 4.0 wspierająca przedłużanie eksploatacji bloków 100 MW – 360 MW*. „Dozór Techniczny” 2017, nr 4.
- [10] Trzeczyski J., *Aktualny stan techniczny oraz możliwości dalszej eksploatacji konwencjonalnych źródeł wytwórczych*. Monografia II Kongresu Elektryki Polskiej, tom II, grudzień 2014 - wrzesień 2016.
- [11] Trzeczyski J., *Doświadczenia i zamierzenia Pro Novum związane z przystosowaniem długo eksploatowanego majątku produkcyjnego elektrowni w Polsce do pracy w perspektywie do 2030 roku*. „Dozór Techniczny” 2016, nr 1.
- [12] Grzesiczek E., Trzeczyski J., Rajca S., *Możliwości wydłużania czasu eksploatacji elementów części przepływowych turbin parowych*. „Energetyka” 2003, nr 12.
- [13] Sprawozdanie *Pro Novum* 049.3096/2014: Badania wybranych elementów krytycznych bloków 200 MW po długotrwałej eksploatacji dla określenia możliwości przedłużania ich eksploatacji do 350 000 godzin. Katowice 2014. Niepublikowane.
- [14] PN/20.2900/2013: Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 200 MW. Część I. Założenia ogólne. Część II. Diagnostyka elementów krytycznych kotła oraz głównych rurociągów parowych i wodnych. Część III. Diagnostyka rur powierzchni ogrzewalnych kotłów. *Pro Novum*. Katowice, luty 2013. Niepublikowane.
- [15] PN/30.2910/2013: Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 200 MW. Część I. Założenia ogólne. Część II. Diagnostyka elementów krytycznych turbin i generatorów. *Pro Novum*. Katowice, luty 2013. Niepublikowane.
- [16] PN/045.3360/2016: Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 100-360 MW. *Pro Novum*. Katowice 2016. Niepublikowane.
- [17] Trzeczyski J., Murzynowski W., Białek S., *Monitorowanie stanu technicznego urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków energetycznych przy wykorzystaniu platformy informatycznej LM System PRO+®*. *Dozór Techniczny* 2011, nr 5.
- [18] Trzeczyski J., *System diagnostyczny zapewniający bezpieczną pracę bloków 200 MW eksploatowanych po przekroczeniu 300 000 godzin*. „Dozór Techniczny” 2012, nr 2.
- [19] Trzeczyski J., *Bloki klasy 200 MW dziś i jutro*. „Energetyka” 2020, nr 6, *Biuletyn Pro Novum* 1/2020.

Rozwój metod predykcyjnych w utrzymaniu majątku produkcyjnego na przykładzie TAURON Wytwarzanie S.A.

Development of predictive methods in maintaining production assets on the example of TAURON Wytwarzanie S.A.

W artykule opisano projekt realizowany w TAURON Wytwarzanie S.A., którego celem jest opracowanie systemu wykorzystującego innowacyjne algorytmy predykcyjno/preskrypcyjne, będące złożonymi modelami klasycznego uczenia maszynowego oraz zaawansowanych algorytmów statystycznych. Prowadzone badania umożliwią poprawę wskaźnika awaryjności. Pilotażowy system diagnostyki monitoruje stan techniczny instalacji i urządzeń bloku w TAURON Wytwarzanie S.A. System dysponuje szeregiem narzędzi klasy Predictive Maintenance, które mają za zadanie na bieżąco monitorować stan techniczny maszyn i przewidywać sytuacje awaryjne kluczowych instalacji, bazując na odczytach wielu danych procesowych, których źródłem są systemy sterujące bloku. Obecnie system diagnostyki predykcyjnej opiera się na danych procesowych z Nadrzędnego Systemu Automatyki. Analiza dużej liczby danych i budowa odpowiednich modeli pozwalają zarówno na wcześniejsze sygnalizowanie problemów technicznych urządzeń krytycznych, jak i na poprawę procesów produkcyjnych przez działanie holistycznego optymalizatora. Systemy predykcji i wykrywania anomalii mają duży potencjał. W przyszłości ich działanie powinno się przełożyć na optymalizację procesu zarządzania majątkiem produkcyjnym.

Słowa kluczowe: TAURON Wytwarzanie S.A., pilotażowy system diagnostyki, metody predykcyjne, optymalizacja procesu zarządzania majątkiem produkcyjnym

The article describes a project implemented at TAURON Wytwarzanie S.A., the aim of which is to develop a system that uses innovative predictive/prescription algorithms, which are complex models of classical machine learning and advanced statistical algorithms. The conducted research will enable the improvement of the failure rate. A pilot diagnostic system monitors the technical condition of the installations and equipment of the unit at TAURON Wytwarzanie S.A. The system has a number of Predictive Maintenance class tools, which are designed to monitor the technical condition of machines and predict emergency situations in key installations, based on numerous process data, the source of which are the unit's control systems. Currently, the predictive diagnostics system is based on process data from the Master Automation System. The analysis of a large amount of data and the construction of appropriate models allow both to signal technical problems of critical devices in advance and to improve production processes through the operation of a holistic optimizer. The systems of prediction and anomaly detection have great potential. In the future their operation should enable optimization of the productive assets management process.

Keywords: TAURON Wytwarzanie S.A., pilot diagnostic system, predictive methods, optimization of the production assets management process

TAURON Wytwarzanie realizuje projekt, którego głównym problemem badawczym jest opracowanie systemu wykorzystującego innowacyjne algorytmy predykcyjno/preskrypcyjne, będące złożonymi modelami klasycznego uczenia maszynowego oraz zaawansowanych algorytmów statystycznych. Dodatkowo w ramach prowadzonych prac będą prowadzone badania nad możliwością wykorzystania modeli samouczących opartych na głębokim uczeniu maszynowym wraz z uwzględnieniem mechanizmu przenoszenia wiedzy (tzw. transfer learning), wykorzystywanego do szybkiego trenowania modeli dla urządzeń podobnych. Opracowane algorytmy posłużą do zarządzania pracą zakładu przemysłowego mając na celu poprawę efektywności i sprawności bloku energetycznego, którego główną instalacją jest kocioł fluidalny. Ponadto opracowane modele posłużą do detekcji anomalii wraz z funkcjonalnościami RCA (z ang. *Root Cause Analysis*) oraz RUL (z ang. *Remaning Useful Life estimation*).

Prowadzone badania umożliwią poprawę wskaźnika awaryjności, co jest jednym z głównych celów projektu. Opracowany w ramach przedmiotowego projektu system będzie uwzględniał wzajemne oddziaływanie poszczególnych elementów systemu, takich jak kocioł, generator, transformator,

a także pozostałych urządzeń bloku z ich integracją. Opracowywany holistyczny optymalizator systemu docelowego powinien uwzględniać integrację wszystkich jego elementów składowych, co w efekcie ma prowadzić do wdrożenia koncepcji spójnego systemu sterowania procesem produkcyjnym instalacji przemysłowej oraz holistycznej optymalizacji tego procesu. Taka modyfikacja zapewni lepszą odporność na niestandardowe zachowania, wykorzystanie wbudowanych mechanizmów samouczenia i tym samym ciągłe podnoszenie jakości systemu sterowania i optymalizacji.

Mając na uwadze fakt, iż podejmowane działania dotyczą krytycznej infrastruktury przemysłowej, konieczne jest opracowanie i implementacja odpowiednich procedur zabezpieczających system predykcyjno/preskrypcyjny przed niekontrolowanym działaniem. W tym celu zostaną wykorzystane modele numeryczne oraz modele zredukowane elementów krytycznych infrastruktury oraz zasoby wiedzy eksperckiej pozwalające na przewidywanie stanów niepożądanych. W ramach podejmowanych prac konieczne jest opracowanie odpowiednich procedur komunikacji, bezpośrednio z tworzonymi w ramach przedmiotowego projektu modelami cyfrowymi oraz repozytoriami modeli cyfrowych urządzeń krytycznych.

Obecny pilotażowy system diagnostyki monitoruje stan techniczny instalacji i urządzeń bloku w *TAURON Wytworzenie S.A.* System dysponuje szeregiem narzędzi klasy Predictive Maintenance, które mają za zadanie bieżąco **monitorować stan techniczny maszyn i przewidywać sytuacje awaryjne** kluczowych instalacji, bazując na odczytach wielu danych procesowych, których źródłem są systemy sterujące bloku.

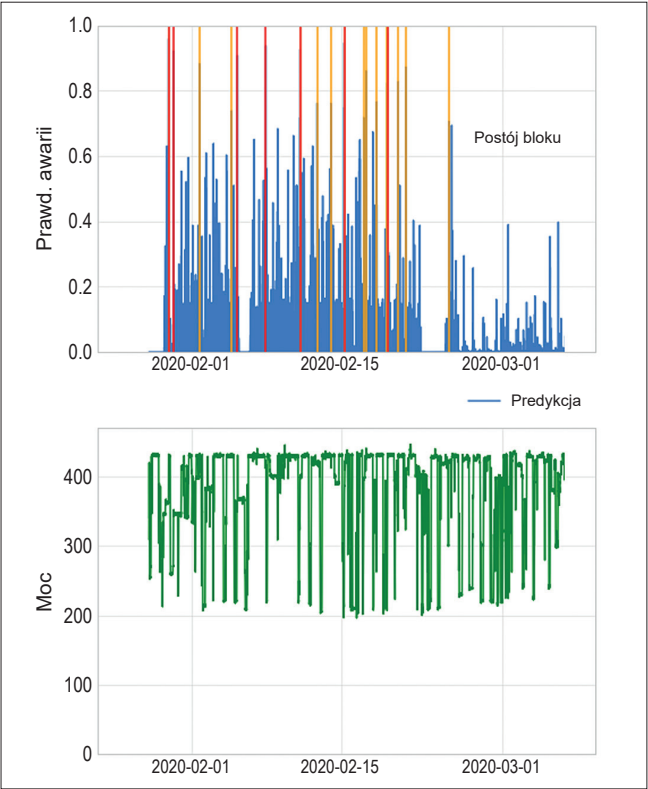
Dodatkowym zadaniem jest przewidywanie anomalii, tj. odstępstw od "normalności" kluczowych parametrów procesu w celu uniknięcia sytuacji mogących doprowadzić do wystąpienia awarii. Rozwiązanie to pozwala również na ocenę jakości wykonanych prac podczas remontu i detekcję zmian w układzie technologicznym powstałych w trakcie jego pracy.

Każdy system klasy PdM obciążony jest sporą wrażliwością na błędy pomiarów oraz generuje fałszywe alarmy. Zawsze należy ustalić wagę każdego z błędów, tj. niewykrycia problemu oraz fałszywego alarmu. W tym konkretnym przypadku wygenerowanie fałszywego alarmu niesie ze sobą mniejsze konsekwencje niż przeoczenie problemu. Poniżej opisane zostały przykładowe alarmy zgłoszone przez system mające odzwierciedlenie w rzeczywistej sytuacji panującej na bloku.

Analiza pracy systemu diagnostyki predykcyjnej – przykłady działania

Diagnostyka łożysk turbiny

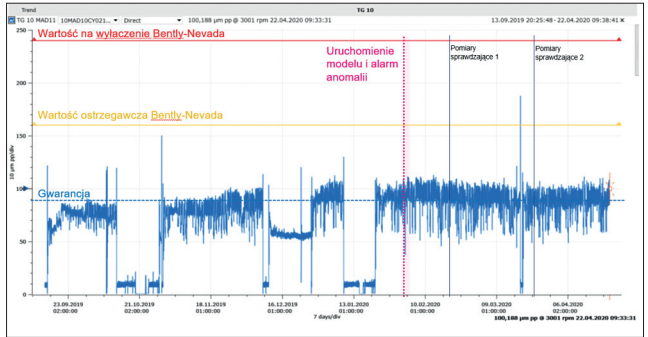
System predykcyjny generował powtarzające się alarmy dla modelu 05E1-10MAD10 łożysko nr 1 – stojak nr 1 badającego stan techniczny łożyska nr 1 turbiny bloku energetycznego.



Rys. 1. Obraz alarmów z systemu diagnostyki predykcyjnej dla łożyska nr 1

Układ nadzoru łożyskowania turbiny oraz generatora składa się z modeli wykrywających anomalie oraz modeli predykcyjnych opierających się na pomiarach drgań i pomiarów temperatury wybranych elementów instalacji. Główne zadanie tej grupy modeli to wykrywanie anomalii w pracy w postaci wzrostów temperatur i wzrostów drgań łożysk. Potencjalny alarm ma zwrócić uwagę operatorów na konkretne pomiary lub grupę pomiarów mogących wskazywać niepożądany stan turbiny lub generatora, który może doprowadzić do jej uszkodzenia, mimo że poziomy sygnałów mieszczą się na poziomie określonym przez instrukcje eksploatacji oraz normy i nie wskazują na występowanie uszkodzenia.

Podczas pracy turbiny, po remoncie kapitalnym, stan dynamiczny w odniesieniu do normy ISO 20816-2:2017 powinien mieścić się w strefie A z wymaganą wartością drgań poniżej 90 $\mu\text{m p-p}$ (szczyt-szczyt).



Rys. 2. Trend drgań łożyska nr 1 od 13.09.2019 do 22.04.2020 roku

Miejscowe pomiary przeprowadzone przez wibrodiagnostów wskazały nieznaczne przekroczenie drgań, na poziomie 100 $\mu\text{m p-p}$, wskazując na stan dynamiczny odbiegający od oczekiwanego, lecz daleki od progów alarmowych określonych przez podstawowy system diagnostyki i nadzoru monitorujący stan dynamiczny turbiny. W podstawowym systemie **progi alarmowe drgań na łożyskach mają wartość 160 $\mu\text{m p-p}$ dla wartości ostrzegawczej i 260 $\mu\text{m p-p}$ dla wartości na wyłączenie turbiny** i ani jeden nie został przekroczony nie zwracając uwagi służb eksploatacji.

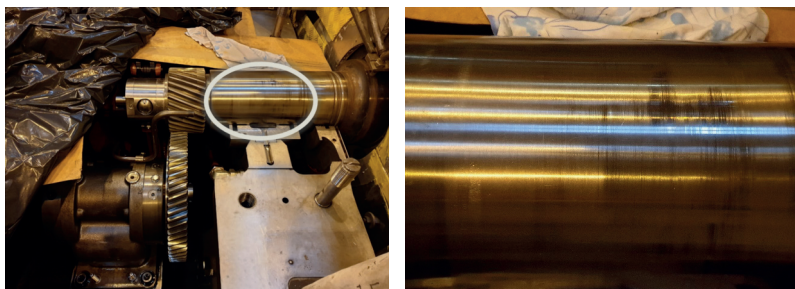
Na podstawie informacji z systemu predykcyjnego przeprowadzono następujące działania diagnostyczne:

- szczegółową analizę drgań względnych w analizatorze BN,
- analizę drgań bezwzględnych,
- ocenę stanu pracy łożyska, z której wynika, że przyczyną alarmów było małe niedociążenie łożyska i zapętlenia świadczące o drobnych przytarcach,
- podjęto decyzję o przeglądzie z uwagi na możliwość wykorzystania gwarancji po wykonanym remoncie.

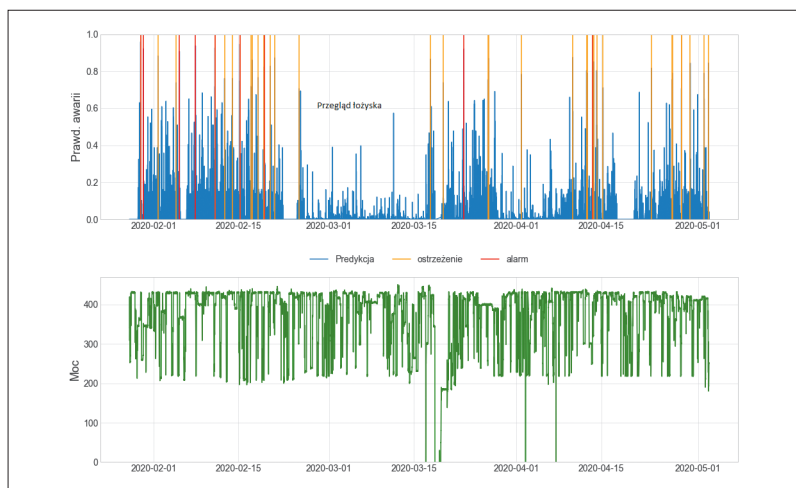
Po naprawie łożyska stwierdzono dużą redukcję alarmów systemu (czerwone kreski), natomiast liczba ostrzeżeń była na zbliżonym poziomie, co przed postojem.

Wniosek

System predykcyjny wykorzystując modele wykrywające anomalie w pracy łożyska nr 1 wygenerował pierwszy alarm na długo przed spodziewanym osiągnięciem przez drgania wartości alarmowych wymagających poprawy pracy turbiny.



Rys. 3 i 4. Obrazy łożyska podczas rewizji

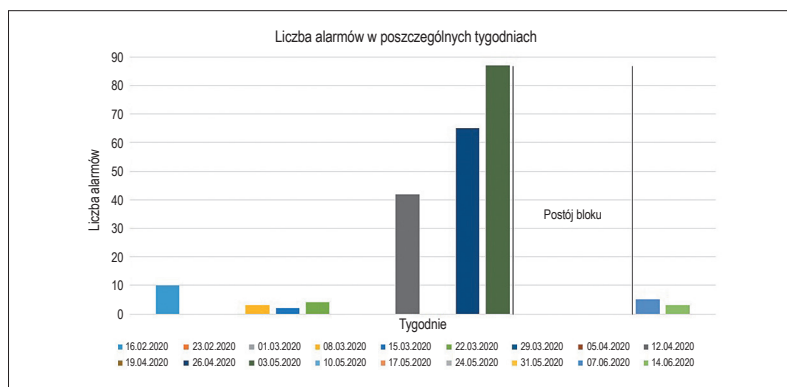


Rys. 5. Porównanie liczby ostrzeżeń i alarmów modelu łożyska nr 1 przed i po przeglądzie

Stan techniczny łożyska po postoju i naprawie poprawił się, ale nadal odbiega od stanu technicznego z okresu nauki systemu predykcji.

Diagnostyka chłodnicy spalin

Model wykrywający anomalie, stworzony na podstawie danych historycznych, analizujący pracę chłodnicy spalin zgłaszał alarmy od momentu jego uruchomienia w lutym 2020 roku do postoju bloku na początku maja tego samego roku (3 miesiące pracy). Zgłosił on w sumie 206 alarmów, z czego zdecydowaną większość (150) w okresie ostatnich dwóch tygodni przed postojem bloku. Analizując pracę instalacji zauważono, że anomalie w pracy chłodnicy narastały podczas ostatnich tygodni eksploatacji i były związane z pogorszeniem się sprawności chłodnicy.



Rys. 6. Liczba alarmów generowanych przez system diagnostyki dla chłodnicy spalin

Po ponownym uruchomieniu instalacji model wciąż generuje alarmy, jednak w znacznie mniejszej liczbie niż wcześniej. Wiąże się to z częściowym remontem, jaki został przeprowadzony na urządzeniu.

Przykład pokazuje możliwości algorytmów predykcyjnych oraz wykrywających anomalie, które przygotowane na podstawie danych historycznych **mogą wykrywać zmiany wynikające z zużycia eksploatacyjnego** lub modyfikacji instalacji, ale również **celowej lub niecelowej zmiany parametrów eksploatacji**, co będzie miało odniesienie do wyników ekonomicznych pracy urządzeń.

Podsumowanie

W chwili obecnej system diagnostyki predykcyjnej opiera się na danych procesowych z Nadrzędnego Systemu Automatyki. Analiza dużej liczby danych i budowa odpowiednich modeli pozwalają zarówno na wcześniejsze sygnalizowanie problemów technicznych urządzeń krytycznych (a tym samym szybszą reakcję służb odpowiedzialnych za ich stan techniczny i utrzymanie), ale także na poprawę procesów produkcyjnych przez działanie holistycznego optymalizatora. Aby podnieść czułość i wszechstronność działania systemu planowane jest dołączanie kolejnych, zidentyfikowanych źródeł danych procesowych, pozwalających na dokładniejszą analizę.

Analityka predykcyjna działa w momencie, gdy stan techniczny urządzenia nie pogorszył się na tyle, aby mógł generować wystąpienie awarii, a koszty przywrócenia do prawidłowego stanu technicznego nie są duże. Wraz z pogarszaniem się stanu technicznego urządzeń koszty naprawy rosną. Podstawowym wymaganiem poprawnej pracy systemu jest posiadanie danych procesowych, charakteryzujących pracę wybranych instalacji w czasie oraz informacje o występujących usterkach. System nie będzie działał w przypadkach losowych; np. uszkodzenia karty sterownika, zwarcia uzwojeń silnika, zaniku napięcia itp. Modele, których działanie jest oparte na wykrywaniu anomalii będą wymagać kalibracji w przypadku zmian konstrukcyjnych podczas przeprowadzonych remontów.

Systemy predykcji i wykrywania anomalii mają duży potencjał nie tylko w przewidywaniu zdarzeń awaryjnych, ale także: w kontroli bieżących parametrów eksploatacji, jakości wykonywanych remontów, nadzorowaniu sprawności/efektywności energetycznej urządzeń. W przyszłości ich działanie powinno się przełożyć na optymalizację procesu zarządzania majątkiem produkcyjnym.

Uszkodzenia wybranych elementów ciśnieniowych pracujących w warunkach pełzania

Damage to selected pressure elements working in creep conditions

Ocena stanu technicznego elementów pracujących w warunkach pełzania powinna wykorzystywać wyniki badań defektoskopowych, metalograficznych i pomiarów deformacji w zakresie zaplanowanym na podstawie retrospekcji oraz analizy warunków pracy w okresie od ostatnich badań i oceny. Wykorzystanie metod mechaniki pęknięcia oraz zdalnej diagnostyki pozwala zarówno określić możliwość i warunki pracy uszkodzonego elementu jak również nadzorować jego bezpieczeństwo, aktualny stan techniczny w trybie on-line. W artykule przedstawiono aktualne, z lat 2019 i 2020, doświadczenia Pro Novum w zakresie identyfikacji uszkodzeń elementów grubościennych pracujących w warunkach pełzania, ich diagnostyki oraz oceny możliwości dalszej eksploatacji.

Słowa kluczowe: kocioł, elementy grubościenne pracujące w warunkach pełzania, identyfikacja uszkodzeń i ich diagnostyka

The assessment of components working in creep conditions should use the results of defectoscopy, metallographic tests and deformation measurements in scope planned on the basis of retrospection and analysis of working conditions in the period from the last tests and assessment. The use of fracture mechanics and remote diagnostics methods allows to determine the possibility and working conditions of the damaged element as well as to monitor its safety and current technical condition in on-line mode. The article presents the current, 2019 and 2020, experience of Pro Novum in the field of identification of damage to thick-walled elements working in creep conditions, their diagnostics and the assessment of the possibility of further operation.

Keywords: boiler, thick-walled elements working in creep conditions, identification of damages and diagnostics

Wstęp

Na stan techniczny elementów grubościennych wpływ mają mechanizmy niszczące, których występowanie uzależnione jest od historii, w tym od czasu oraz warunków ich eksploatacji. W pierwszej fazie eksploatacji elementów spodziewamy się występowania wad konstrukcyjnych i montażowych, problemów z pełzaniem oczekuje się dopiero po dłuższym czasie ich pracy, w odpowiednich do wystąpienia pełzania warunkach. Doświadczenie pokazuje jednak, że takie podejście może okazać się zbyt ogólne i w rzeczywistości procesy prowadzące do powstania uszkodzeń mają bardziej złożony charakter. Niemal każdy remont lub dłuższy postój wiąże się z naprawami i modernizacjami, co może stanowić zagrożenie błędami konstrukcyjnymi i montażowymi, a dodatkowo elementy długo eksploatowane mogą być narażone na wiele czynników niszczących, np. zmęczenie, korozję (także postojową), a nie tylko na oddziaływanie temperatur i naprężeń stacjonarnych (quasi-stacjonarnych) w długim okresie pracy.

Nie bez znaczenia jest dobrze znany (ale czy zrozumiany?) w branży problem zmiany warunków pracy bloków w stosunku do ich przeznaczenia założonego na etapie projektowania (tryb pracy cyklicznej stopniowo zastępuje pracę ciągłą). Zmiana ta w wielu przypadkach jest możliwa ze względu na „zapas elastyczności” w obszarze prowadzenia kotła, jednak nie dzieje się to bez negatywnych konsekwencji m.in. dla jego elementów grubościennych.

W niniejszym artykule chcielibyśmy przedstawić aktualne (z lat 2019 i 2020) doświadczenia Pro Novum w zakresie identyfikacji uszkodzeń elementów grubościennych pracujących w warunkach pełzania, ich diagnostyki oraz oceny możliwości dalszej eksploatacji.

Elementy pracujące w warunkach pełzania

Pełzanie to uzależniony od czasu proces deformacji materiału zachodzący w wysokiej temperaturze i przy stałym naprężeniu. Za elementy pracujące w warunkach pełzania przyjmuje się te, których obliczeniowa temperatura pracy jest równa lub wyższa od temperatury granicznej dla danej stali (czyli temperatury, powyżej której procesy pełzaniowe wywierają istotny wpływ na trwałość). W tabeli 1 wyróżniono elementy grubościenne, które mogą pracować w warunkach pełzania.

Tabela 1

Elementy grubościenne, które mogą pracować w warunkach pełzania

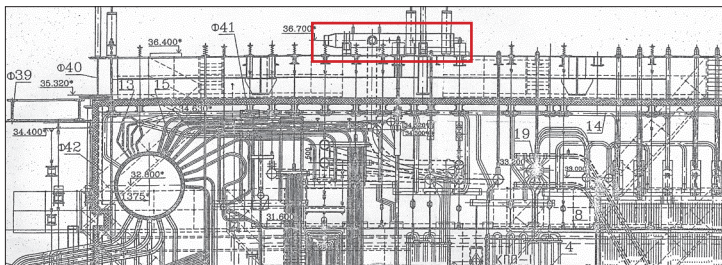
Węzeł konstrukcyjny	Element	Warunki pracy
Parownik	walczak	$t_r < t_g$
	komory ekranowe	
Przegrzewacze pary	komory przegrzewaczy pary	$t_r > t_g$
		$t_r < t_g$
	rurociągi komunikacyjne	$t_r > t_g$
		$t_r < t_g$
		$t_r < t_g$
Podgrzewacz wody	schładzacze pary	$t_r > t_g$
		$t_r < t_g$
Podgrzewacz wody	komory	$t_r > t_g$
		$t_r < t_g$

t_r – temperatura pracy, t_g – temperatura graniczna dla danej stali.

Przypadek nr 1

Kolektor wylotowy pary świeżej

Kolektor wylotowy pary świeżej (Ø377 x 40 mm, stal 12H1MF) zabudowany na stropie kotła łączy poprzez dwa rurociągi komunikacyjne (dochodzące do kolektora po bokach) wylot III^o przegrzewacza pary świeżej z rurociągiem pary świeżej.



Rys. 1. Kolektor wylotowy pary świeżej

Po ok. 70000 godzin pracy przy temperaturze ~ 540°C uszkodzeniom uległy spoiny łączące kolektor z rurociągami komunikacyjnymi (rys. 2). Już w trakcie badań wizualnych zidentyfikować można było pęknięcia występujące w SWC po stronie rurociągu komunikacyjnego (rys. 2 i 3 – pęknięcie nr 1, na wylot) oraz w SWC po stronie kolektora (rys. 2 – pęknięcia nr 2 i 3). Badania magnetyczno-proszkowe potwierdziły występowanie pęknięć oraz pozwoliły określić ich długość, która wynosiła nawet pół obwodu spoiny. Badania metalograficzne wykazały obecność pustek pełzaniowych w mikrostrukturze w badanych obszarach.

Oględziny stropu kotła pozwoliły ustalić przyczynę uszkodzeń. Trasa rurociągów komunikacyjnych przebiegała z międzystropia na zewnątrz kotła, wzdłuż bocznych ścian do góry, a następnie przez kolana 90° poziomo dochodziła do kolektora. Zawieszenia rurociągów zloka-

lizowane przy wspomnianych kolanach okazały się za-blokwane (wspawane pręty), co doprowadziło do „przesztynienia” całego układu. Choć element pracował w założonej przez obliczenia temperaturze, to dodatkowe naprężenia wywołane przez blokadę zawieszęń doprowadziły do pojawienia się pustek pełzaniowych, a następnie pęknięć. Nie miały wpływu na skalę i charakter uszkodzeń miały również procesy zmęczeniowe, które w trakcie uruchomień i odstawień kotła (kiedy to wydłużenia są największe) oraz pośrednio podczas pracy dodatkowo nadwyrężały układ.

Przypadek nr 2

Komora wylotowa przegrzewacza pary świeżej III^o

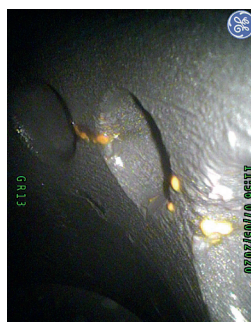
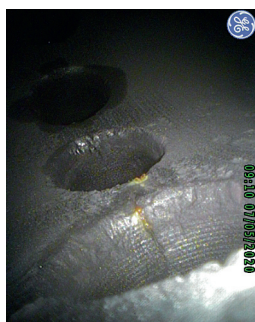
Komora wylotowa PPP III^o (Ø273 x 64 mm, stal 10H2M) po ok. 200 000 godzin eksploatacji podlegała kompleksowym badaniom nieniszczącym. W trakcie badań endoskopowych powierzchni wewnętrznej wykryto pęknięcia na krawędziach i tworzących ok. 30 otworów pod węzownice oraz na mostkach międzyotworowych (rys. 4). Jako przyczynę uszkodzeń określono warunki pracy oraz możliwe przedostawanie się skroplin pary (po odstawieniu kotła) do komory (komora połączona jest rurociągami komunikacyjnymi z położonym wyżej poziomym kolektorem). Z uwagi na brak możliwości naprawy lub wymiany, komora została objęta nadzorem diagnostycznym polegającym na monitorowaniu warunków jej pracy w sposób umożliwiający kontrolę ewentualnej propagacji pęknięć z wykorzystaniem metod i kryteriów mechaniki pęknięcia na podstawie normy BS 7910 – 2013+A1:2015.



Rys. 2. Kolektor wylotowy pary świeżej – uszkodzenia



Rys. 3. Kolektor wylotowy pary świeżej – pęknięcie nr 1, na wskroś grubości ścianki



Rys. 4. Komora wylotowa PPP III^o – pęknięcia na krawędziach i tworzących otworów oraz mostkach międzyotworowych

Przypadek nr 3

Schładzacz pary świeżej II°

Spośród elementów grubościennych kotła schładzacz pary pracują w jednych z najgorszych warunków. Wysoka temperatura pary przy jednoczesnej niskiej temperaturze czynnika chłodzącego wymaga szczególnych rozwiązań konstrukcyjnych, co niestety często nie jest wystarczające do uchronienia elementu przed uszkodzeniami. Analizowany przypadek to dwa schładzacze pary świeżej II° (Ø273 x 54 mm, stal 10H2M), do których dostarczana jest para o temperaturze ok. 515°C. Obydwa schładzacze przepracowały ~ 200 000 godzin i podobnie jak komora opisywana powyżej podlegały badaniom nieniszczącym w szerokim zakresie.

Doświadczenie wskazuje, że w pierwszej kolejności powinno zostać wykonane badanie endoskopowe powierzchni wewnętrznej, gdyż to właśnie negatywne wyniki tego badania mogą mieć decydujący wpływ na dalsze losy elementu (na co jeszcze zwrócimy uwagę w artykule). Tak też stało się w tym przypadku. Badania endoskopowe wykazały na obu schładzaczach popękaną „koszulkę” ochronną w okolicach otworu pod lance aparatu wtryskowego oraz rozległe pęknięcia na krawędzi i tworzącej samego otworu (rys. 5). W takich sytuacjach konieczne jest określenie rozmiaru uszkodzonego obszaru, co po usunięciu pęknięć pozwala na rozwiercenie otworu i w przypadku obliczeniowego potwierdzenia takiego rozwiązania, zabudowanie nowego króćca.

Po odcięciu starego króćca, otwór i tworzące poddano badaniom magnetyczno-proszkowym, które wykazały pęknięcia (rys. 6) również wychodzące na powierzchnię zewnętrzną (czyli w okolice nieistniejącej już spoiny łączącej króciec wtrysku z komorą). Rozmiary pęknięć i ewentualne ubytki powstałe po ich usunięciu wykluczały rozwiercenie otworu (zbyt duża średnica), zdecydowano więc o wymianie całego, jednego schładzacza, a w przypadku drugiego, o wstawianiu wstawki (po wcześniejszym wycięciu fragmentu schładzacza z uszkodzonym otworem).

Przyczyny uszkodzeń schładzaczy są typowe dla tego typu elementów i związane są głównie z termoszokowym oddziaływaniem czynnika chłodzącego na gorącą powierzchnię komory/koszulki ochronnej. Lance aparatów wtryskowych pękają, a dysze odpowiedzialne za rozpylanie nie robią tego prawidłowo lub urywają się, co prowadzi do zalewania komory nieodparowaną wodą. Również inercja całego układu wtryskowego (co często

łączy się z charakterem prowadzenia konkretnego kotła) może prowadzić do dostarczania zbyt dużej ilości wody w stosunku do strumienia i temperatury pary, co ostatecznie skutkuje tylko częściowym odparowaniem.

Warunkowa eksploatacja uszkodzonych elementów

W omawianych powyżej przypadkach, jak i ogólnie w przypadku podobnych uszkodzeń, użytkownik w zasadzie ma trzy wyjścia, które pozwolą mu kontynuować pracę bloku.

Pierwsza opcja to **naprawa**, która, jeśli tylko jest możliwa, stanowi zazwyczaj najprostsze i najtańsze rozwiązanie. Usunięcie pęknięć z powierzchni zewnętrznej, a potem naprawa np. przez spawanie to czynności, które czasami można wykonać nawet bez wydłużania czasu trwania remontu.

W sytuacji, w której nie ma możliwości naprawy (uszkodzenia są od strony powierzchni wewnętrznej lub są zbyt rozległe) **element może zostać zakwalifikowany do częściowej lub całkowitej wymiany**. Użytkownik może uważać się za szczęściarza, gdy w magazynie czeka już element, który w ramach remontu można bez większych opóźnień zabudować. Zazwyczaj jednak takich elementów nie ma i operacja wymiany wiąże się z prefabrykacją nowego elementu, przeprowadzeniem montażu (który w obszarze np. międzystropia może być wyjątkowo skomplikowany) i wydłużeniem czasu postoju bloku, co wiąże się z poniesieniem olbrzymich kosztów.

Dla drugiego rozwiązania istnieje jednak kusząca i zdecydowanie tańsza **alternatywa w postaci warunkowej eksploatacji uszkodzonych elementów**. Warunkowa eksploatacja jest realizowana na podstawie rzeczywistych pomiarów parametrów pracy (głównie temperatury metalu) przy pomocy istniejącej już na bloku infrastruktury pomiarowej lub specjalnie do tego celu zamontowanej (zazwyczaj jest to kwestia uzupełnienia) oraz na podstawie obliczeń uwzględniających mechanikę pęknięcia. Obliczenia realizowane są z wykorzystaniem brytyjskiej normy BS:7910:2013 + A1:2015: „Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”, która również określa kryteria dopuszczenia do eksploatacji oraz jej warunki. Gdy z obliczeń wynika, że geometria pęknięć oraz warunki pracy pozwalają na dalszą eksploatację, element może być nadal użytkowany. W świetle powyższych działań (akceptowanych przez UDT) użytkownik może określić horyzont dalszej pracy i zaplanować wymianę elementu.



Rys. 5. Schładzacz II° – pęknięcia na koszulce ochronnej oraz krawędzi i tworzącej otworu pod lancę aparatu wtryskowego



Rys. 6. Schładzacz II° – stan po badaniach MT

Ocena stanu technicznego elementów pracujących w warunkach pełzania powinna wykorzystywać wyniki badań defektoskopowych, metalograficznych i pomiarów deformacji w zakresie zaplanowanym na podstawie retrospekcji oraz analizy warunków pracy w okresie od ostatnich badań i oceny.

Doświadczenia zdobyte, zwłaszcza w ostatnim czasie, na blokach eksploatowanych w coraz bardziej regulacyjnym trybie wskazują, że uszkodzenia bardzo rzadko mają charakter pełzaniowy. Uszkodzenia pełzaniowe zlokalizowane są wyłącznie w miejscach występowania naprężeń większych od projektowych (błędy konstrukcyjne, montażowe, remontowe). Najczęściej wykrywa się pęknięcia termozmęczeniowe, w tym zlokalizowane na powierzchniach wewnętrznych, a więc praktycznie nienaprawialne.

Wykorzystanie metod mechaniki pękania [1] oraz zdalnej diagnostyki pozwala zarówno określić możliwość i warunki pracy uszkodzonego elementu jak również nadzorować jego bezpieczeństwo i aktualny stan techniczny w trybie on-line [2,3].

- [1] BS 7910 – 2013+A1:2015: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
- [2] Murzynowski W., Trzeczyszyński J., *Nadzór diagnostyczny nad warunkową eksploatacją uszkodzonych schładzaczy do czasu ich wymiany lub naprawy*. „Energetyka” 2019, nr 7, *Biuletyn Pro Novum* nr 1/2019.
- [3] Trzeczyszyński J., Murzynowski W., Stanek R., *Nadzór diagnostyczny elementów grubo ściennych kotła K-5 w Elektrowni Dolna Odra w okresie ich warunkowej eksploatacji – zastosowana metodyka i doświadczenia po dwuletniej eksploatacji*. „Energetyka” 2020, nr 12, *Biuletyn Pro Novum* nr 2/2020.

Wojciech Sikorski, Tomasz Bijak

Przedsiębiorstwo Usług Naukowo-Technicznych „Pro Novum” Sp. z o.o.

Wymagania towarzyszące diagnostyce turbin parowych

Requirements accompanying the diagnostics of steam turbines

Turbiny parowe to jedno z bardziej skomplikowanych urządzeń eksploatowanych w energetyce. Warunki ich pracy wiążą się zarówno z oddziaływaniem wysokiej temperatury i ciśnienia czynnika roboczego, jak również sił bezwładności wirujących elementów. Na podstawie obszernej, dotychczasowej wiedzy i wieloletnich doświadczeń opracowano szereg wytycznych badań i oceny stanu technicznego turbin parowych, jak również zalecenia remontowe dotyczące także regeneracji i rewitalizacji praktycznie wszystkich elementów ich układów przepływowych. Ocena stanu technicznego i remont turbosprężarki powinny być poprzedzone analizą dokumentacji, historii remontów, ewentualnych modernizacji oraz wyników wcześniej wykonanych badań. Wszystkie wykonywane badania nieniszczące mają znaczenie dla późniejszej oceny stanu technicznego poszczególnych elementów, a tym samym całego turbosprężarki. Ostatnią fazą diagnostyki jest ocena stanu technicznego elementów turbosprężarki. Towarzyszyć jej powinna analiza warunków eksploatacji, zarówno pod kątem cieplno-mechanicznym, jak i chemicznym, w okresie od ostatniego remontu. Niezwykle istotna jest także kontrola stanu dynamicznego. Jako firma diagnostyczna *Pro Novum* rekomenduje korzystanie ze zdalnej diagnostyki umożliwiającej ocenę stanu technicznego i weryfikację prognozy trwałości w czasie rzeczywistym.

Słowa kluczowe: turbiny parowe, diagnostyka, wytyczne badań i oceny stanu technicznego turbin parowych, zalecenia remontowe, zdalna diagnostyka

Steam turbines are one of the most complex devices used in a power sector. Their working conditions are related both to the influence of high temperature and pressure of working medium as well as the inertia forces of rotating elements. On the basis of extensive previous knowledge and many years of experience, a number of guidelines for testing and assessment of steam turbines as well as overhaul recommendations for regeneration and revitalization of almost all elements of flow systems have been developed. The assessment and overhaul of turbine set should be preceded by an analysis of documentation, history of overhauls, possible modernization and the results of previously performed tests. All performed NDT are important for further assessment of individual elements and thus the entire turbine set. The last stage of diagnostics is assessment of the turbine set elements. It should be accompanied by the analysis of operation conditions both in terms of thermo-mechanical and chemical properties since the last overhaul. It is also of a great importance to control the dynamic state. As a diagnostic company *Pro Novum* recommends to use remote diagnostic for assessment and verification of the durability forecast in a real time.

Keywords: steam turbines, diagnostics, guidelines for testing and assessment of steam turbines, overhaul recommendations, remote diagnostics

Turbiny parowe to bez wątpienia jedno z bardziej skomplikowanych urządzeń eksploatowanych w energetyce. Wynika to zarówno z ich konstrukcji i niezwykle wymagających warunków pracy, ale przede wszystkim z dokładności, jaką należy zachować podczas montażu poszczególnych elementów. Warunki pracy wiążą się zarówno z oddziaływaniem wysokiej temperatury i ciśnienia czynnika roboczego, jak również sił bezwładności

wirujących elementów. Warunki pracy bloków energetycznych, zwłaszcza długo eksploatowanych, w tym także turbosprężarek pogarsza w ostatnich latach ich coraz bardziej regulacyjny tryb pracy. W celu zapewnienia ich bezpieczeństwa oraz oczekiwanej dyspozycyjności należy unikać błędów eksploatacyjnych, a przeglądów i remontów zapewniać odpowiedni zakres i poziom techniczny.

Remontom powinny towarzyszyć, dobrze zaplanowane na podstawie retrospekcji oraz analizy warunków pracy, badania diagnostyczne zarówno nieniszczące jak i niszczące. Te ostatnie należy wykonywać zwłaszcza dla tych elementów turbozespołów, które eksploatowane są ponad trwałość projektową. Należy mieć na uwadze, że badania to tylko część diagnostyki. Towarzyszyć im powinny zawsze ocena stanu technicznego, prognoza trwałości oraz zalecenia remontowe i eksploatacyjne.

Podstawowe zasady diagnostyki turbin

Diagnostyce powinna towarzyszyć analiza historii eksploatacji i warunków pracy co najmniej w okresie międzyremontowym. Czynności te pomagają opracować optymalny zakres badań, jak również zalecenia dla obsługi po wykonaniu oceny stanu technicznego i opracowaniu prognozy trwałości. Dopuszczenie turbozespołu do dalszej eksploatacji w uwarunkowanym jego stanem technicznym i oczekiwanym przez użytkownika horyzoncie czasowym wymaga spełnienia kilku warunków.

Jednym z nich jest oczekiwany przez zamawiającego zakres badań. Uwarunkowany jest on najczęściej oczekiwaniami eksploatacyjnymi/produkcyjnymi, możliwymi do przeznaczenia na remont środkami finansowymi oraz charakterem postoju, który może być:

- minimalny – stosowany najczęściej w sytuacjach awaryjnych; pomija się wówczas wykonywanie diagnostyki elementów, które w ostatnim remoncie nie wykazywały problemów oraz tych nienależących do grupy krytycznych; nie dochodzi w tym wypadku do otwarcia kadłubów; postój tego rodzaju nie służy ocenie żywotności, a jedynie uporaniu się z problemami utrudniającymi lub uniemożliwiającymi dalszą eksploatację;
- średni – towarzyszy mu pełny zakres badań nieniszczących większości elementów turbozespołu; bierze się także pod uwagę wykonanie badań niszczących pobierając wycinki w sposób niewymagający naprawy po ubytkach materiału; wyniki badań traktuje się jako podstawę do zaplanowania remontu kapitalnego (głównego); niekiedy remontowi średniemu towarzyszą obliczenia wytrzymałościowe, wykonywane zwykle metodą elementów skończonych;
- kapitalny (główny) – obejmuje zwykle zakres remontu średniego; jest jednak wzbogacony o opcje uwzględniające bardziej zaawansowane działania, np. rewitalizację.

Na podstawie obszernej, dotychczasowej wiedzy i wieloletnich doświadczeń opracowano szereg wytycznych badań i oceny stanu technicznego turbin parowych [1, 2], jak również zalecenia remontowe dotyczące także regeneracji i rewitalizacji praktycznie wszystkich elementów ich układów przepływowych.

Ocena stanu technicznego i remont turbozespołu powinny być poprzedzone analizą dokumentacji, historii remontów, ewentualnych modernizacji oraz wyników wcześniej wykonanych badań. Ważna jest także znajomość warunków eksploatacji, zwłaszcza w okresie od ostatniego remontu. Szczególne znaczenie posiada znajomość sytuacji awaryjnych oraz działań podejmowanych przez użytkownika po ich identyfikacji. Istotne znaczenie ma ustalenie ich przyczyn oraz działań o charakterze remontowym i zapobiegawczym.

Do klasycznych czynności towarzyszących ocenie stanu technicznego turbozespołów należy analiza ilości uruchomień w ujęciu sumarycznym oraz w podziale na poszczególne stany cieplne. Dane te umożliwiają wyznaczenie ekwiwalentnego czasu pracy oraz obliczenie stopnia wyczerpania trwałości elementów, co w kolejnym kroku daje sposobność do przedstawienia dla nich analizy ryzyka. Ostatnim z kluczowych aspektów retrospekcji jest fakt, na który nie każdy użytkownik zwraca uwagę. Chodzi mianowicie o konserwację układu w momencie dłuższego wyłączenia z ruchu. Jej brak lub niewłaściwe zastosowanie prowadzi na ogół do powstawania i rozwoju ognisk korozji postojowej. Skutki tego zjawiska są szczególnie dobrze zauważalne na powierzchniach łopatek wirników (rys. 1).

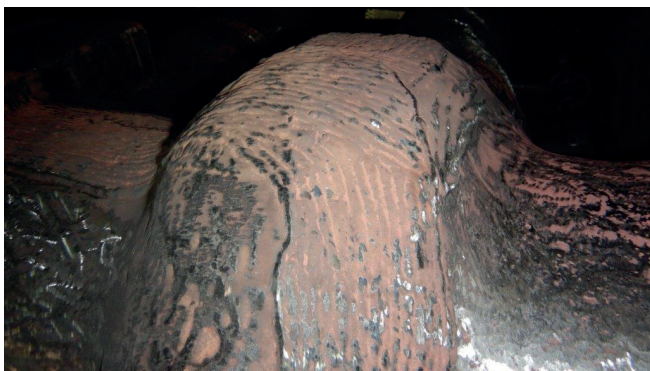


Rys. 1. Przykład ubytku materiału łopatek w wyniku korozji postojowej

Istotne znaczenie dla poszerzenia wiedzy o obiekcie może mieć wizyta inspekcyjna, która powinna być także przedmiotem umowy. Najwięcej ważnych dla diagnostyki i remontu informacji uzyskuje się po otwarciu układu przepływowego lub podczas demontażu poszczególnych części. Zarejestrowane wówczas obecności osadów, ciał obcych czy też deformacje niektórych elementów mogą mieć istotne znaczenie dla firmy diagnostycznej, remontowej i użytkownika. Jest to ważne, zwłaszcza gdy z retrospekcji wiadomo o przypadkach występowania stanów awaryjnych. Duże znaczenie mają własne, wizualne oględziny, a nie tylko analiza dokumentacji zdjęciowej udostępnionej przez użytkownika. Dużo ważnych informacji zawiera analiza przełomów, które dostarczają istotnych informacji o genezie awarii oraz jej przebiegu.

Nie wszystkie czynności diagnostyczne i remontowe można przewidzieć w okresie tworzenia ich zakresów. Użytkownik zawsze powinien się liczyć z potrzebą wykonania prac dodatkowych, które mogą się pojawić w czasie trwania remontu.

Niezwykle istotną kwestią, przede wszystkim w kontekście dotrzymania harmonogramu, jest właściwe przygotowanie do badań powierzchni poszczególnych elementów oraz ich otoczenia. Dla oszczędności czasu warto zatem zadbać o stworzenie dogodnych warunków do przeprowadzania badań nieniszczących. W pierwszej kolejności należy wspomnieć o przygotowaniu powierzchni do badań. Niejednokrotnie po przyjeździe na obiekt stwierdza się, że element pokryty jest zendrą i wygląda tak, jak to przykładowo pokazano na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Komora zaworowa „przygotowana” do badań



Rys. 3. Wnętrze komory zaworowej udostępnionej do badań – obszary z grubą warstwą zgorzeliny



Rys. 4. Niedoszlifowane obszary elementu przekazanego do badań

Usunięcie zendry nie zawsze jest proste, gdyż zgorzelina posiada względnie wysoką twardość, jest to jednak możliwe, a co więcej – niezbędne. Przeprowadzanie badań nieniszczących w momencie, gdy na powierzchni elementu znajduje się zendra jest niedopuszczalne i prowadzi do uzyskiwania niemiarodajnych oraz przekłamanych wyników.

Kolejnym przykładem braku przygotowania powierzchni do badań mogą być obszary, w których zarejestrowane zostały nieciągłości materiału znajdujące się w bliskiej odległości obszarów niewyczyszczonych. Z dużą dozą prawdopodobieństwa można zakładać, iż obecne są one również pod zgorzeliną (rys. 5 i 6).

Należy mieć na uwadze, iż nie wszystkie powierzchnie można przygotować do badań przez szlifowanie. W pewnych przypadkach pozostaje tylko możliwość czyszczenia strumieniowo-ściernego. To, jaki zastosuje się do tego materiał (kulki szklane, śrut, korund itp.) ma duże znaczenie w kontekście uzyskiwanego efektu, nie jest to jednak sprawa krytyczna.



Rys. 5. Obszar nieciągłości w pobliżu pozostawionej zgorzeliny



Rys. 6. Potencjalne nieciągłości sąsiadujące z obszarem nieprzygotowanym do badań

Na rysunkach 7-10 przedstawione zostały przykłady elementów podlegających przygotowaniu w technologii strumieniowo-ściernej. Łatwo zauważyć, iż nie do wszystkich obszarów można w prosty sposób dotrzeć. Jak już jednak wspomniano, usunięcie zgorzeliny oraz osadów jest niezbędne do uzyskania wiarygodnych wyników badań. Warto zauważyć także, iż zaprezentowane na rysunku 7 osady nie pojawiają się w przypadku każdego badanego wirnika. Ich występowanie świadczy o błędach popełnianych podczas eksploatacji turbozespołu i/lub zanieczyszczeniu czynnika obecnego w obiegu. Niedokładne przygotowanie powierzchni metodą strumieniowo-ścierną zostało zaprezentowane już wcześniej (rys. 1).

Okolice łopatki zamkowej, a więc przede wszystkim rejon studzienki (rys. 8), są niezwykle istotne pod względem wytrzymałościowym dla całego stopnia. Wynika to w dużej mierze z występowania w tym obszarze wysokich naprężeń. W związku z tym powierzchnia w tym miejscu musi być pozbawiona jakichkolwiek natotów.

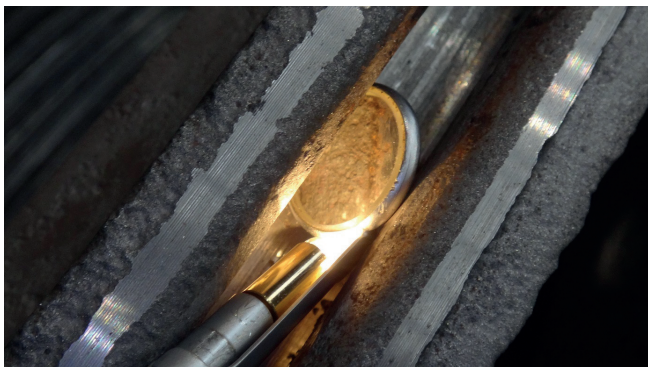


Rys. 7. Osady pozostawione pod bandażami stopnia łopatkowego



Rys. 8. Niedoczyszczona studzienka zamkowa

Bardzo trudno dostępnym obszarem jest wręb łopatkowy stopnia wirnikowego. Na podstawie literatury, a także własnych doświadczeń z ostatnich kilku lat stwierdzić można, iż są to miejsca podlegające częstym uszkodzeniom o różnej skali. Niezależnie jednak od rozległości uszkodzeń jest to rejon mocowania łopatek, na które oddziałują znaczne naprężenia wynikające z temperatury i ciśnienia pary, siły odśrodkowej oraz siły bezwładności. Wobec tego nawet najmniejsze nieprawidłowości oraz defekty w tym rejonie stanowią znaczny problem. Na kolejnych rysunkach pokazano znaczne nieprawidłowości przy czyszczeniu wrębu łopatkowego (rys. 9 i 10).



Rys. 9. Niedoczyszczona powierzchnia wrębu łopatkowego

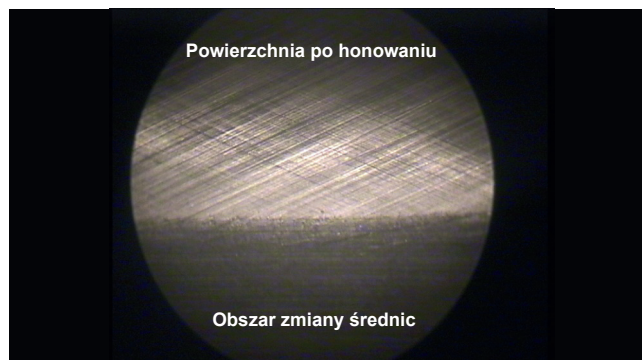


Rys. 10. Produkty korozji oraz osady obecne we wrębie łopatkowym

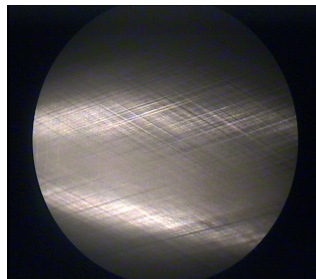
Wszystkie wykonywane badania nieniszczące mają znaczenie dla późniejszej oceny stanu technicznego poszczególnych elementów, a tym samym całego turbozespołu. Nie inaczej jest w przypadku inspekcji/badań oraz pomiarów wykony-

wanych w otworze centralnym wirnika. Obszar ten zwyczajowo podlega honowaniu, które pozwala oczyścić powierzchnię, jednocześnie usuwając minimalny fragment materiału, mogący zawierać wady powstałe na skutek eksploatacji, jak również wady technologiczne.

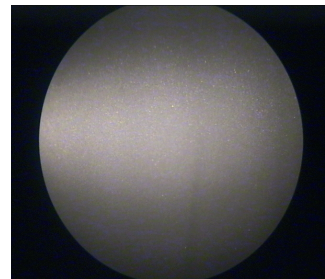
Na rysunku 11 widoczny jest stan powierzchni po honowaniu (górna część zdjęcia). Drugi ukazany obszar to fragment miejsca zmiany średnic. Z przyczyn technologicznych ich honowanie nie jest możliwe, w związku z czym zalecane jest w takim wypadku czyszczenie strumieniowo-ściernie. Daje to także dodatkowe korzyści, gdyż stan powierzchni po takim procesie znacznie różni się od tego, jaki można uzyskać po honowaniu (rys. 12 i 13). W związku z tym łatwiej jest interpretować uzyskiwane wyniki badań i pomiarów.



Rys. 11. Obszar zmiany średnic w otworze centralnym



Rys. 12. Stan powierzchni otworu centralnego po honowaniu



Rys. 13. Stan powierzchni otworu centralnego po czyszczeniu strumieniowo-ściernym (kulkami szklanymi)

Występują również elementy, w przypadku których wymagany jest specjalny sposób przygotowania. Wynika on przede wszystkim z zastosowanych metod badań i pomiarów, ale również z charakteru prac, jakim poddawane są dane elementy podczas montażu i demontażu. Bardzo dobrym przykładem są śruby szpilkowe (w tym wypadku kadłuba zewnętrznego WP). Podlegają one najczęściej badaniom wizualnym, ultradźwiękowym, pomiarowi twardości, a kiedyś podlegały również pomiarom długości. Stosowane badania defektoskopowe wymagają przygotowania powierzchni czołowej każdej ze śrub na obu jej końcach (rys. 14). Jednak pomiar twardości wykonać należy na przeszlifowanej/przepolerowanej powierzchni, mniej więcej w połowie długości szpilki. Wynika to z faktu silnego nagrzewania oraz uderzania młotem powierzchni czołowych podczas montażu i demontażu, a czynności takie mogą mieć wpływ na lokalną twardość materiału (rys. 15).



Rys. 14. Śruby szpilkowe kadłuba zewnętrznego przygotowane do badań UT



Rys. 15. Śruby szpilkowe kadłuba zewnętrznego przygotowane pod pomiar twardości

Ostatnie przykłady dotyczące przygotowania powierzchni mogą być swego rodzaju parafrazą powiedzenia, iż „broń jest tak skuteczna, jak ręka, która nią włada”. Wiele bowiem zależy nie tylko od zastosowanego środka ściernego (w przypadku technologii strumieniowo-ściernej), ale przede wszystkim od umiejętności osoby obsługującej dane urządzenie. Często zdarza się, iż pozornie gotowa do badań powierzchnia jest tak naprawdę nadal pokryta zendrą, która pod wpływem czyszczenia uległa jedynie delikatnemu przetarciu, doprowadzającemu do jej „zaświecenia” (rys. 16). Powierzchnia tego typu nadal nie nadaje się do przeprowadzania na niej badań defektoskopowych.



Rys. 16. Pozornie przygotowana powierzchnia kadłuba

Inną sytuacją wskazującą na kwalifikacje piaskarza jest praca przy obszarach konstrukcyjnie „delikatnych”. Dla przykładu ukazane zostały (rys. 17) uszczelnienia dławnicowe, których blaszki wygięto na skutek niewłaściwie prowadzonej lancy oraz doboru nieodpowiedniego ciśnienia.



Rys. 17. Powyginane blaszki uszczelnień podczas piaskowania

Omawiając przygotowania powierzchni do badań należy zwrócić także uwagę na kilka ważnych kwestii. W przypadku prowadzenia prac na elementach narażonych na obecność olejów lub smarów, jak również w sytuacji, gdy badania wykonywane są w formule etapowej pomiędzy naprawami, powierzchnie powinny zostać odtłuszczone przed rozpoczęciem jakichkolwiek dalszych działań badawczych. Dotyczy to np. czopów wirnikowych, których jakość stanu powierzchni weryfikowana jest techniką penetracyjną.

Nie można również zapominać, iż czynności przeprowadzane na terenie zakładu energetycznego wymagają bardzo często wznoszenia rusztowań. Podesty lub deskowania zainstalowane tak, iż uzyskuje się zbyt duże oddalenie lub położenie za blisko podlegającego badaniom elementu, mogą w pewien sposób rzutować na komfort pracy badacza. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku braków w deskowaniu, jednak w tym wypadku rusztowanie nie powinno zostać odebrane i przeznaczone do użytkowania. Należy zatem zawsze przeprowadzić dokładną kontrolę stanowiska pracy pod kątem dostępu do elementu i ewentualnie dokonywać korekt poprzez kontakt z firmą odpowiedzialną za rusztowania.

Pozostając przy kwestii dostępności powierzchni nie można nie wspomnieć o usytuowaniu niektórych elementów. Często zdarza się, że nie ma możliwości dojścia do pewnych obszarów z odpowiednim urządzeniem ani nawet dokładnego obejrzenia danego obszaru. Wobec tego nie powinny nikogo dziwić zapisy w zakresach, oznajmujące o wykonywaniu badań na 100% dostępnej powierzchni. Pamiętajmy, iż do właściwego przeprowadzenia badań, np. magnetyczno-proszkowych potrzeba odpowiedniego przyłożenia defektoskopu, właściwego dozowania środka badawczego, a przede wszystkim ciągłej obserwacji procesu. Nie można zatem stosować w tym wypadku porównania świadczącego o tym, iż skoro szlifierz potrafił przygotować daną powierzchnię, to i badacz będzie w stanie wykonać swoje czynności. Bez wątpienia dużym udogodnieniem jest prowadzenie badań w warunkach warsztatowych, gdzie poza swobodnym dostępem do danego elementu z każdej strony, można również wspomagać się suwnicą. Podsumowując, przed przystąpieniem do badań miejsca powinny zostać

odpowiednio sprawdzone przez badającego, co połączone może być z potrzebą przeprowadzenia badań wizualnych. Wszelkie nieprawidłowości podczas tego rodzaju odbioru należy zgłaszać do poprawy. Kwestia przygotowania powinna być również ustalana pomiędzy firmą za to odpowiedzialną a świadczącą usługi badawcze, gdyż różne rodzaje badań wymagają często odmiennych form czyszczenia powierzchni.

Przeprowadzanie badań na terenie obiektu niesie ze sobą również różnego rodzaju ryzyka. Wiele z tych zagrożeń wpływa w pewnym stopniu na obniżenie komfortu pracy badacza. Uwagę należy zwracać także na występowanie gorących powierzchni, ostrych i wystających przedmiotów, stref o podwyższonym poziomie hałasu, ale też na prace wykonywane przez inne ekipy remontowe w tym samym czasie. Wszystkie te czynniki (i wiele innych) oddziałują na osobę przeprowadzającą badania.

Właściwie prowadzona diagnostyka wymaga także, poza przygotowaniem powierzchni, zapewnienia adekwatnych warunków dla danej metody badań. Może to być odpowiednie natężenie światła białego lub wystarczające zaciemnienie. Czynnikiem wpływającym na jakość badań może być także temperatura zarówno samego elementu, jak również otoczenia.

Przechodząc do interpretacji zarejestrowanych wyników należy zwracać uwagę na fakt, iż duża ilość zapisów w poszczególnych normach odnosi się do elementów opuszczających miejsce produkcji. W diagnostyce turbin mamy prawie zawsze do czynienia z elementami podlegającymi bardzo często wieloletniej eksploatacji. Z tego względu ważne jest doświadczenie osoby analizującej wyniki, a tym samym tworzącej na ich podstawie dokument dopuszczający do dalszej pracy, jak również personelu sprawdzającego i autoryzującego. Doświadczenie wraz ze stosowaniem się do sztuki inżynierskiej pozwalają na właściwą interpretację wyników badań oraz podejmowanie prawidłowych wniosków z diagnostyki oraz decyzji remontowych.

Wraz z badaniami NDT wykonywane powinny być badania niszczące na odpowiednio wybranych do tego elementach. Ich selekcja determinowana jest konstrukcją, warunkami, w jakich pracują, istotnością w układzie przepływowym, historią eksploatacji, a dokładniej wykonywanymi dotychczas naprawami i aktualną kondycją, wynikającą z badań nieniszczących.

Na właściwie przeprowadzony proces związany z badaniami niszczącymi składa się kilka etapów. Pierwszym z nich jest prawidłowe wskazanie miejsc poboru wycinków. Obszar taki nie może być przypadkowy. Częstokroć poszczególne rejonu danego elementu poddawane są działaniu różnych czynników niszczących. Oprócz miejsc wykonanych z materiału rodzimego zlokalizowane są spoiny. Drugi etap polega na pobieraniu wycinka. Faza ta jest ściśle powiązana z pierwszą, gdyż odpowiednie usytuowanie obszaru pozwoli na łatwe pobranie wycinka. Kolejnym krokiem jest właściwe oznaczenie poszczególnych próbek oraz sporządzenie dokumentacji zdjęciowej. Pozwala to na uzyskanie pewności, iż późniejsze wyniki będą skorelowane z rzeczywistymi właściwościami materiału w danym obszarze. Faza czwarta to badania niszczące, kolejna to poprawna interpretacja ich wyników, od której zależy często decyzja o potrzebie i sposobie naprawy. Dobrze dobrana technologia, np. rewitalizacji, decyduje o długoletniej pracy elementu. Wyniki badań niszczących wpływają także na ocenę stanu technicznego i prognozę trwałości. W tym miejscu warto zauważyć jednak, że wstępną wiedzę na temat stanu materiału można uzyskać na podstawie badań metalograficznych oraz

pomiarów twardości. Ostatnim krokiem w badaniach niszczących jest archiwizacja zniszczonych próbek.

Często nieodzownym działaniem jest wykonanie analizy wytrzymałościowej metodą elementów skończonych. Wykorzystuje się ją zarówno do oceny stanu technicznego i prognozowania trwałości, jak również przy wspieraniu i uzasadnianiu poprawności decyzji remontowych. Obecne na rynku oprogramowanie daje możliwość przeprowadzenia modelowania praktycznie dowolnych elementów, a nawet urządzeń i instalacji, zaawansowanych symulacji z dziedziny mechaniki, przepływu płynu, transportu ciepła oraz wielu innych.

Ostatnią fazą diagnostyki jest ocena stanu technicznego elementów turbozespołu. Towarzyszyć jej powinna analiza warunków eksploatacji, zarówno pod kątem cieplno-mechanicznym, jak i chemicznym, w okresie od ostatniego remontu. Uwagę zwrócić warto na parametry czynnika roboczego, gradienty pól temperatur, temperaturę oleju łożyskowego oraz nabór mocy turbiny [4]. Może to pomóc w sformułowaniu dodatkowych zaleceń dla obsługi. Niezwykle istotna jest także kontrola stanu dynamicznego. Powinna zostać uzupełniona o analizę wydłużeń względnych i bezwzględnych elementów układu przepływowego. Może pozwolić uniknąć wystąpienia przytarć uszczelnień nadbandażowych, uszczelnień międzystopniowych, uszczelnień ławnicowych, jak również łopatek o elementy stacjonarne.

Na poszczególne elementy turbozespołu oddziałuje wiele różnego rodzaju zjawisk degradacyjnych. Dodać do tego trzeba bogatą historię eksploatacji poszczególnych jednostek oraz stopniowo ograniczane budżety remontowe. Coraz bardziej regulacyjny charakter pracy turbozespołów to nowe i poważne wyzwanie zarówno dla ich stanu technicznego, dla użytkownika jak również dla firm diagnostycznych. W tej sytuacji rekomendujemy jako firmę diagnostyczną korzystanie ze zdalnej diagnostyki umożliwiającej ocenę stanu technicznego i weryfikację prognozy trwałości w czasie rzeczywistym [6]. To najtańszy nadzór nad bezpieczeństwem i dyspozycyjnością turbozespołu.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Dobosiewicz J., *Eksploatacyjna przydatność turbin małej mocy po przekroczeniu 200 000 godzin pracy*, „Energetyka” 1993, nr 7.
- [2] PN/30.2910/2013: Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń cieplno-mechanicznych bloków 200 MW. Część I. Założenia ogólne. Część II. Diagnostyka elementów krytycznych turbin i generatorów. *Pro Novum*. Katowice, luty 2013. Niepublikowane.
- [3] Dobosiewicz J., *Badania diagnostyczne urządzeń cieplno-mechanicznych w energetyce*. Część I, Warszawa 1998.
- [4] Dobosiewicz J., Grzesiczek E., *Uszkodzenia nasadzanych kół roboczych turbin parowych*, „Energetyka” 1992, nr 12.
- [5] Grzesiczek E., Rajca S., *Diagnostyka turbozespołów na blokach eksploatowanych w trybie regulacyjnym*. „Energetyka” 2019, *Biuletyn Pro Novum* 2/2019.
- [6] Trzeszczyński J., *Ocena stanu technicznego i prognozowanie trwałości elementów krytycznych urządzeń cieplno-mechanicznych przewidzianych do eksploatacji powyżej 300 000 godzin*, „Energetyka” 2010, nr 12.

Nadzór diagnostyczny elementów grubościennych kotła k-5 w *Elektrowni Dolna Odra* w okresie ich warunkowej eksploatacji – zastosowana metodyka i doświadczenia po dwuletniej eksploatacji

Diagnostic supervision of thick-walled elements of boiler k-5 in *Dolna Odra Power Plant* during its conditional operation – the applied methodology and experience after two years of operation

W artykule przedstawiono skuteczne rozwiązanie problemu, jaki został zidentyfikowany podczas remontu kotła w *Elektrowni Dolna Odra*. Wykryto wtedy wskazania na powierzchniach wewnętrznych grubościennych elementów międzystropia kotła OP-650. Wskazania okazały się praktycznie nienaprawialne. Opracowana przez *Pro Novum* i uzgodniona z Urzędem Dozoru Technicznego metodyka nadzoru diagnostycznego, wykonanie prac korekcyjnych w obszarze armatury wtryskowej oraz przeprowadzenie cyklicznych badań sprawdzających przez CLDT na zlecenie PGE GiEK umożliwiło warunkową, bezpieczną eksploatację komór schładzaczy i komór wylotowych przegrzewacza pary pierwotnej kotła K-5 przez prawie 10 000 godzin. Podczas dwuletniej eksploatacji elementów ze wskazaniami zapewniono ich pełne bezpieczeństwo oraz dyspozycyjność kotła.

Słowa kluczowe: *Elektrownia Dolna Odra*, kocioł k-5, nadzór diagnostyczny elementów grubościennych, warunkowa eksploatacja, metodyka nadzoru diagnostycznego *Pro Novum*

The article presents an effective solution to the problem identified during the overhaul of the boiler in *Dolna Odra Power Plant*. Indications were detected on the internal surfaces of the thick-walled interfloor elements of the boiler OP-650. They turned out to be practically irreparable. The methodology of diagnostic supervision developed by *Pro Novum* and agreed with the Office of the Technical Inspection as well as correction works in the area of injection fittings and cyclic checking tests performed by CLDT commissioned by PGE GiEK enabled conditional safe operation of the cooler chambers and outlet chambers of the primary steam superheater of the boiler k-5 by almost 10 000 hours. During the two year operation of the elements with indications their full safety and availability have been ensured.

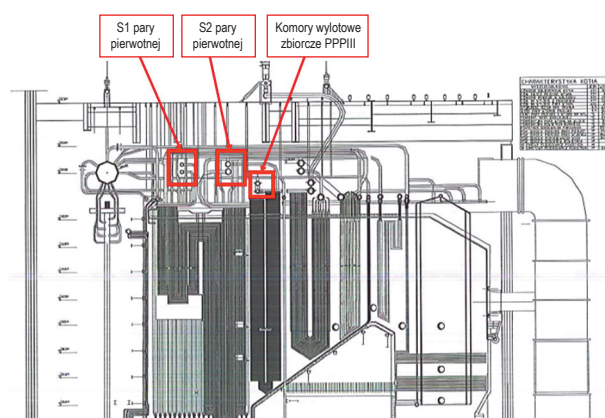
Keywords: *Dolna Odra Power Plant*, boiler k-5, diagnostic supervision of thick-walled elements, conditional operation, *Pro Novum* methodology of diagnostic supervision

Niniejszy artykuł powstał na podstawie referatu wygłoszonego podczas XXII Sympozjum *Pro Novum* [1]. Przedstawiono skuteczne rozwiązanie problemu, jaki został zidentyfikowany podczas remontu kotła. Wykryto wtedy wskazania na powierzchniach wewnętrznych grubościennych elementów międzystropia kotła OP-650. Wskazania okazały się praktycznie nienaprawialne. Aby uzyskać dopuszczenie urządzenia do eksploatacji zastosowano nadzór diagnostyczny w okresie do wymiany i naprawy elementów. Pozwolił na to ich stan techniczny określony przy pomocy metod mechaniki pękania. Podczas dwuletniej eksploatacji elementów ze wskazaniami zapewniono ich pełne bezpieczeństwo oraz dyspozycyjność kotła.

Geneza problemu

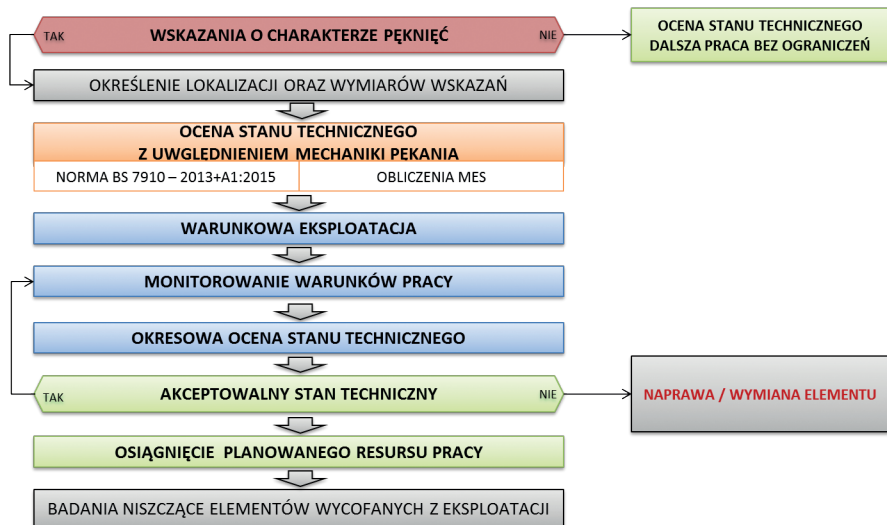
W trakcie kampanii remontowej w 2018 r. podczas badań endoskopowych wykryto wskazania na powierzchniach wewnętrznych komór pary pierwotnej, co było podstawą do dalszych działań.

Usytuowanie elementów w kotle (komory schładzaczy S1 i S2 oraz komory wylotowe pary pierwotnej) ze zlokalizowanymi wskazaniami przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Usytuowanie komór schładzaczy S1 i S2 oraz komór wylotowych przegrzewacza pary pierwotnej kotła K-5

Rys. 2.
Schemat procesu nadzoru diagnostycznego nad warunkową pracą uszkodzonych elementów ciśnieniowych kotła



Wykryte wskazania podczas badań endoskopowych zostały potwierdzone badaniami ultradźwiękowymi. W uzgodnieniu z UDT, PGE GiEK zleciło wykonanie badań techniką ToFD przez CLDT, co pozwoliło określić skalę i rozmiar wskazań. Wykonano także badania MT oraz metalograficzne od strony powierzchni zewnętrznej komór. Wszystkie wskazania powierzchniowe zostały naprawione [2-4].

Elementy ze zlokalizowanymi wskazaniami pracują podstawowo w warunkach pełzania. Narażone są jednak okresowo także na zmęczenie cieplne oraz termoszk jako rezultat kontaktu rozgrzanego metalu z wodą wtryskową (schładzacze) oraz kondensatem z wykroplonej pary podczas postoju kotła (nieodwodnione lub niedostatecznie odwodnione poziome odcinki komór). Ugięcie komór lub nieprawidłowe spadki mogą nasilać te zjawiska.

Efekt zjawisk jw. jest wzrost naprężeń, co w konsekwencji prowadzi do powstania pęknięć zlokalizowanych na dolnych tworzących komór w postaci:

- siatki pęknięć w części niewierconej komór i/lub w postaci pęknięć „słoneczkowych” na krawędziach otworów – pęknięcia termoszkowe;
- pęknięć obwodowych zlokalizowanych w miejscach największego momentu gnącego i/lub najniższych własności materiałowych, np. w strefie wpływu ciepła spoin obwodowych;
- pęknięć zorientowanych osiowo, gdy na skutek osłabienia materiału komory (degradacja własności) lub głębokich pęknięć termoszkowych istotny wpływ na rozwój pęknięcia zaczynają wywierać naprężenia obwodowe (od ciśnienia pary).

Podczas remontu na komorach, które w konsekwencji, w okresie warunkowej eksploatacji objęto nadzorem diagnostycznym, wykryto wskazania typu a) i typu b). Pęknięcia tego rodzaju są praktycznie nienaprawialne [6-8].

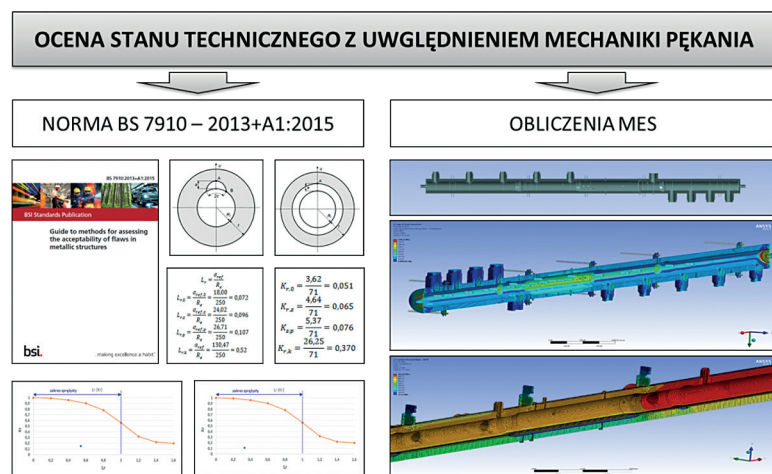
Nadzór diagnostyczny nad warunkową eksploatacją

Ogólny schemat procesu nadzoru diagnostycznego nad warunkową pracą uszkodzonych elementów ciśnieniowych kotła przedstawiono na rysunku 2.

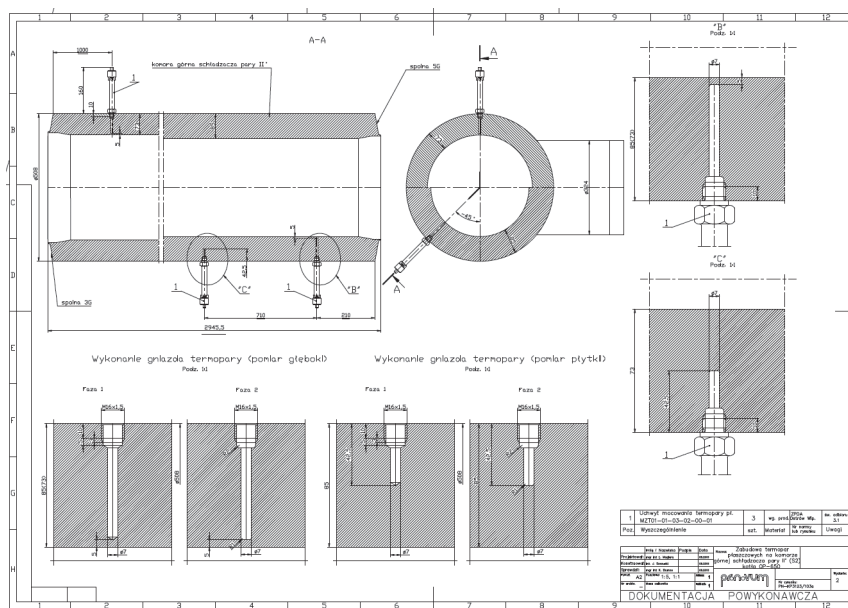
Wykryte podczas badań NDT (VT) wskazania o charakterze pęknięć zweryfikowano klasycznymi badaniami ultradźwiękowymi. Pozwoliło to na określenie dokładnej lokalizacji oraz pomiar głębokości i długości wskazań.

Ocena stanu technicznego – możliwości i warunków dalszej pracy uszkodzonego elementu kotła – wymagała sięgnięcia po metody i kryteria mechaniki pęknięcia. Obliczenia z wykorzystaniem mechaniki pęknięcia wykonano korzystając z odpowiednich norm – w przypadku omawianych elementów kotła posłużono się normą BS 7910 – 2013+A1:2015: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures [5].

W opisanym przypadku obliczenia wykazały, że rozmiary rzeczywistych pęknięć są mniejsze od wartości krytycznych, których nie osiągną także w okresie do planowanej wymiany. Obliczenia nośności granicznej wykazały wystarczający zapas bezpieczeństwa konstrukcji. Komory zakwalifikowano do warunkowego nadzoru diagnostycznego (rys. 3). Ocenie stanu technicznego uszkodzonych elementów towarzyszyły symulacje różnych, możliwych warunków pracy elementu z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES).



Rys. 3. Przykład wyników obliczeń komór metodą elementów skończonych z wykorzystaniem mechaniki pęknięcia



Rys. 4.
Przykład projektu
zabudowy termopar
na komorze schładzacza
pary świeżej III stopnia

Analiza warunków pracy komór była warunkiem koniecznym sprawowania nadzoru diagnostycznego. Pozwoliła ona, na podstawie bieżących danych pomiarowych, wykonywać w trybie on-line obliczeniowe monitorowanie propagacji pęknięć zwiaryrowanych metodą ultradźwiękową.

Po zweryfikowaniu istniejącego systemu pomiarowego pod kątem przydatności do wykonywania obliczeń o odpowiedniej jakości na elementach objętych nadzorem diagnostycznym podjęto decyzję o zabudowaniu dodatkowych czujników temperatur metalu na wszystkich komorach (rys. 4).

W odniesieniu do elementów podlegających UDT – przed wdrożeniem nadzoru – indywidualnie dla każdego przypadku należy opisaną metodykę uzgadniać z Urzędem Dozoru Technicznego. W omawianym przypadku po spełnieniu tego warunku rozpoczęto nadzór diagnostyczny wspierany odpowiednio rozbudowaną i skonfigurowaną wersją platformy informatycznej LM System PRO+® [9].

Zaimplementowane w formie software'u formuły obliczeniowe umożliwiły obliczeniowe śledzenie propagacji wykrytych pęknięć. System na podstawie analizy warunków pracy elementów na bieżąco analizował współczynniki intensywności naprężeń w poszczególnych pęknięciach i dokonywał oceny ich bezpieczeństwa.



Rys. 5. LM System PRO+® – okresowy raport z bieżącej oceny bezpieczeństwa pracy elementu z akceptowalnymi, według kryteriów mechaniki pęknięcia, wskazaniami

W tym celu wykorzystano procedury z normy [5] i metodę Rain Flow do schematyzacji amplitud naprężeń. Użytkownik urządzenia otrzymywał okresowe raporty o stanie technicznym elementu(-ów), z wnioskami i zaleceniami Specjalistów Pro Novum; przykład przedstawiono na rysunku 5.

Stan techniczny komór po dwuletniej eksploatacji

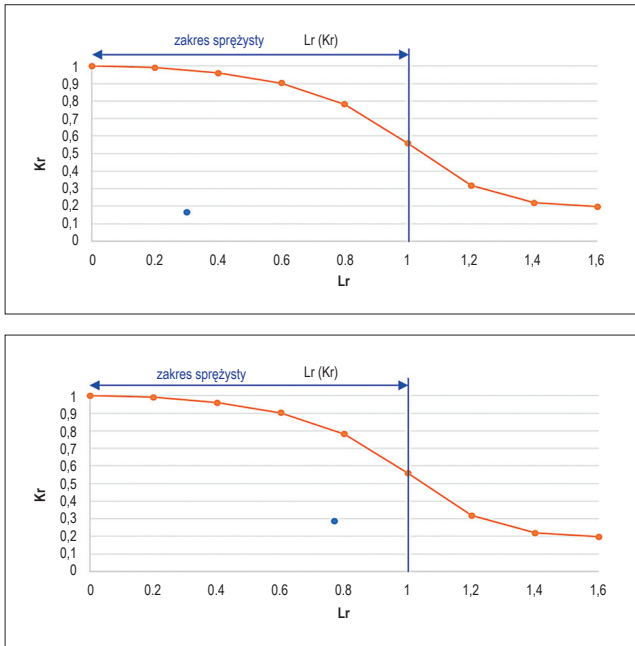
W okresie warunkowego nadzoru diagnostycznego wspieranego przez LM System PRO+® wykonywano bieżącą weryfikację stanu technicznego elementów z oceną bezpieczeństwa ich pracy.

Po roku sprawowania nadzoru wykonano badania kontrolne metodą ToFD, zlecone przez PGE GiEK (badania wykonało CLDT). Na kilkanaście analizowanych przypadków wskazań, w dwóch przypadkach stwierdzono przyrost wskazania na komorze schładzacza S2. Po trzech miesiącach od zakończenia badań przeprowadzono powtórne badania, w których nie stwierdzono propagacji wskazań.

Roczna analiza warunków pracy ujawniła zwłaszcza wysokie wartości różnic temperatur metalu w komorach schładzaczy pomiędzy ich górną a dolną tworzącą oraz na grubości ścianki w trakcie uruchomień i odstawień. Wywoływało to istotny wzrost naprężeń na dolnych tworzących uszkodzonych elementów. Dodatkowo, w miejscach uszkodzonych, w takich sytuacjach wzrastał współczynnik intensywności naprężeń K1.

Wykonano ponowne obliczenia wytrzymałościowe na podstawie normy BS 7910 – 2013+A1:2015, uwzględniające roczną analizę stanu naprężeń – w szczególności maksymalne naprężenia na dolnej tworzącej komór.

Wyniki wskazały, że obliczone dla szczelin parametry Lr i Kr mieściły się wewnątrz obwiedni stanów dopuszczalnych, co oznaczało, że są to przypadki bezpieczne, a to świadczy o zapasie bezpieczeństwa. W przypadku największych zarejestrowanych naprężeń podczas rocznej pracy komór parametry Lr i Kr znajdowały się również w miejscu oddalonym od obwiedni granicznej (rys. 6).



Rys. 6. Obliczenia L_r i K_r dla górnej komory schładzacza S1 (wskazania 1) oraz dla komory dolnej schładzacza S2 (wskazania 2) po rocznej eksploatacji

Analiza wyników badań z 2018, 2019 i 2020 roku, warunków pracy elementów oraz ich bieżącego stanu technicznego wykazała:

- możliwe powiększenie dwóch wskazań na komorze schładzacza S2 dolnej, na podstawie badań CLDT w listopadzie 2019 r.; w ponownych badaniach schładzacza S2 (CLDT – styczeń 2020) nie wskazano na możliwość powiększenia się rozmiarów wskazań;
- obliczenia wytrzymałościowe na podstawie normy BS 7910 – 2013+A1:2015, uwzględniające dwuletnią analizę stanu naprężeń, w szczególności maksymalne naprężenia na dolnych tworzących komór, wskazywały, że nawet dla wskazań o największych rozmiarach wartości parametrów L_r i K_r mieściły się wewnątrz obwiedni stanów dopuszczalnych, co oznacza, że nadal warunek bezpieczeństwa jest spełniony ze sporym zapasem;
- stan techniczny oraz prognoza trwałości elementów, na których wykryto/zlokalizowano wskazania wskazywały, że mogą być eksploatowane dłużej niż to pierwotnie założono;
- poinformowano Użytkownika elementów, że w przypadku gdyby ich wymiana okazała się utrudniona w zaplanowanym terminie, mogłyby być eksploatowane nadal pod warunkiem kontynuowania nadzoru diagnostycznego.

Elementy zostały wymienione podczas remontu w 2020 r. Na elementach tych zamontowano na podstawie wytycznych *Pro Novum* odpowiednią ilość czujników pomiarowych do monitorowania ich stanu technicznego. Po wymianie elementów na nowe zalecono wykonanie badań niszczących tych elementów w celu potwierdzenia obecności pęknięć, ich rozmiarów oraz wyjaśnienia charakteru i przyczyn uszkodzenia.

Podsumowanie

Opracowana przez *Pro Novum* i uzgodniona z Urzędem Dozoru Technicznego metodyka nadzoru diagnostycznego, wykonanie prac korekcyjnych w obszarze armatury wtryskowej oraz przeprowadzenie cyklicznych badań sprawdzających przez CLDT na zlecenie *PGE GiEK* umożliwiło warunkową, bezpieczną eksploatację komór schładzaczy i komór wylotowych przegrzewacza pary pierwotnej kotła K-5 przez prawie 10 000 godzin.

Zastosowany nadzór diagnostyczny stanowi jedną z możliwości zdalnej diagnostyki z zaimplementowanymi algorytmami i kryteriami analizy zmęczenia i mechaniki pęknięcia, której wdrożenie może poprawić bezpieczeństwo i dyspozycyjność urządzeń energetycznych nawet wtedy, gdy elementy są uszkodzone, tj. wtedy, gdy ich naprawa lub wymiana nie jest w danej chwili możliwa lub gdy jest nieopłacalna, zwłaszcza w końcowym okresie resursu urządzenia.

PIŚMIENNICTWO

- Trzeszczyński J., Stanek R. (*Pro Novum*) przy udziale J. Śniegowskiego i T. Tokarka (*PGE GiEK S.A. Oddział Zespół Elektrowni Dolna Odra*), *Nadzór diagnostyczny elementów grubościennych kotła k-5 w Elektrowni Dolna Odra w okresie ich warunkowej eksploatacji – zastosowana metodyka i doświadczenia po dwóch latach eksploatacji*. XXII Sympozjum *Pro Novum*. Katowice, 8-9 października 2020.
- Sprawozdanie *Pro Novum* I/PN/080.3662/2018 (niepublikowane).
- Sprawozdanie *Pro Novum* 026.3725/2019 (niepublikowane).
- Sprawozdanie *Pro Novum* PN/071.3653/2018 (niepublikowane).
- BS 7910 – 2013+A1:2015: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
- Parol M., Pawlicki J., Zwoliński J., *Analiza pęknięcia elementów urządzeń energetyki ciepłej w warunkach szoków cieplnych i wysokiego ciśnienia*. Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Zakład Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji, Warszawa 2018.
- Dobosiewicz J., *Ugięcia komór przegrzewaczy pary*. „Energetyka” 1995, nr 10.
- Dobosiewicz J. Zbroińska-Szczuchura E., *Ocena trwałości komór przegrzewaczy kotłów parowych pracujących w warunkach pełzania*. „Energetyka” 2008, nr 1, *Biuletyn Pro Novum* 1/2008.
- Trzeszczyński J., Murzynowski W., *Nadzór diagnostyczny nad warunkową eksploatacją uszkodzonych schładzaczy do czasu ich wymiany lub naprawy*. „Energetyka” 2019, nr 7, *Biuletyn Pro Novum* nr 1/2019.

XXII Sympozjum Informacyjno-Szkoleniowe DIAGNOSTYKA I REMONTY URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH – Diagnostyka źródłem wiedzy dla strategii eksploatacji

W dniach 8-9 października 2020 r. w Courtyard® by Marriott® Katowice City Center w Katowicach odbyło się zorganizowane przez Przedsiębiorstwo Usług Naukowo-Technicznych „Pro Novum” sp. z o.o. XXII Sympozjum Informacyjno-Szkoleniowe DIAGNOSTYKA I REMONTY URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH, którego tematem przewodnim w tym roku była „Diagnostyka źródłem wiedzy dla strategii eksploatacji”.

Patronat Honorowy nad tym Wydarzeniem sprawowały – podobnie jak w poprzednich latach – Urząd Dozoru Technicznego oraz Towarzystwo Gospodarcze Polskie Elektrownie. Patronami merytorycznymi tegorocznej edycji Sympozjum były z kolei TAURON Wytwarzanie SA i ENEA Elektrownia Połaniec SA.

Wszystkie najważniejsze czasopisma branżowe objęły Sympozjum patronatem merytorycznym, a były to: *Dozór Techniczny*, *Energetyka*, *Energetyka Ciepła* i *Zawodowa*, *Nowa Energia* oraz portale: *Cire.pl* i *kierunekenergetyka.pl*, a także czasopismo *Europerspektywy*.

Z uwagi na tegoroczne ograniczenia wynikające z sytuacji epidemicznej liczba uczestników Sympozjum została istotnie zmniejszona, jednak nie wpłynęło to na program wydarzenia. Podczas dwóch dni Sympozjum odbyło się 6 sesji, w ramach których wygłoszonych zostało 14 referatów.

Sympozjum *Pro Novum* po raz kolejny pokazało, że w branży energetycznej istnieje potrzeba wszechstronnej dyskusji na tematy techniczne i wymiany doświadczeń, a bardziej kameralne grono uczestników zachęciło do ożywionych rozmów i podejmowania ważnych tematów.





Tematyka XXII Sympozjum okazała się aktualna i ważna dla polskiej energetyki, podobnie jak ta z poprzednich jego edycji. Energetyka czy szerzej gospodarka Unii Europejskiej posiada wizję przypominającą strategię do 2050 roku. Horyzont strategii dla naszej energetyki to 2025 rok – wyznacza go Rynek Mocy oraz planowany, znaczący wzrost generacji z OZE do 2030 roku. Skutki gospodarcze i społeczne epidemii mogą jednak zmodyfikować te plany. Jedno wydaje się pewne, bloki konwencjonalne wkroczyły w bardzo nietypową dla siebie regulacyjną fazę eksploatacji. Będą pracować krócej, z niższą mocą, będą uruchamiane częściej. Będą pracowały pod silną presją ekonomiczną oraz przy słabnących kompetencjach technicznych, zwłaszcza w zakresie technicznego utrzymania. Bloki długo eksploatowane wkroczyły w ostatnią fazę eksploatacji. Dla poszczególnych bloków może ona potrwać od ok. 3 do ok. 15 lat. W tym czasie diagnostyka powinna być nie tylko źródłem informacji. Odpowiednio wykonywana może być źródłem wiedzy, a ta z kolei źródłem strategii, zwłaszcza w zakresie bezpieczeństwa i dyspozycyjności. Bezpośrednio i pośrednio w wielu referatach zwracano uwagę, że ilość badań nie musi przekładać się na jakość wiedzy. Wtedy ich koszt może

okazać się nieakceptowalny. Potrzebną do zapewnienia bezpieczeństwa i dyspozycyjności wiedzę można jednak uzyskać przy akceptowalnych kosztach. W tym celu powinniśmy korzystać z wieloletnich doświadczeń oraz chronić kompetencje przed ich szybszym wyczerpaniem niż trwałość urządzeń. Należy zwłaszcza korzystać ze zdalnej diagnostyki i współczesnych metod zaawansowanej analityki oraz sztucznej inteligencji. Takie podejście do diagnostyki było widoczne w wielu referatach, może najbardziej w wygłoszonych przez przedstawicieli *Enea Elektrownia Połaniec SA*, *TAURON Wytwarzanie SA*, *Pro Novum sp. z o.o.* oraz *AGH*. *Pro Novum* oferuje zdalną diagnostykę dla urządzeń ciepłno-mechanicznych od ponad 15 lat. Najnowsze jej wersje wyposażono w algorytmy zaawansowanej analityki, mechaniki pęknięcia oraz sztucznej inteligencji. Ta forma diagnostyki poprawia bezpieczeństwo urządzeń, wspiera kompetencje personelu, a niektóre jej wersje zaimplementowane w skali jednej klasy urządzeń i bloków energetycznych umożliwiają także wymianę doświadczeń. To najlepsze podejście dla zapewnienia bezpieczeństwa i dyspozycyjności bloków energetycznych i urządzeń w ostatniej fazie ich rewersu, przy jednoczesnym wzroście wymagań Operatora.



Przedsiębiorstwo Usług Naukowo-Technicznych "Pro Novum" Sp. z o.o.
ul. Wróble 38, 40-534 Katowice
pronovum@pronovum.pl, www.pronovum.pl