



**Dr inż. Jerzy Trzecznyński**

PRZEDSIĘBIORSTWO USŁUG NAUKOWO-TECHNICZNYCH  
„PRO NOVUM” SP. Z O.O.

## Diagnostyka źródłem wiedzy i strategii eksploatacji

**Streszczenie:** 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.

## Diagnostics as a source of knowledge and operation strategy

**Summary:** 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.

20 listopada ubiegłego roku zmarł Franciszek Pchełka.

Wielki techniczny Autorytet polskiej energetyki, animator współpracy polskich inżynierów, dobry człowiek, mój Przyjaciel.

Wspomnieniu Jego postaci poświęcam ten artykuł.

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. Złaszcza 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 elek-

troenergetycznego, 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, niskonakładowej poprawy elastyczności. Z tych względów diagnostykę „od zawsze” traktowaliśmy w Pro Novum jako system zintegrowany z eksploatacją urządzeń [3-5]. Rozwój i potaniecie 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  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  i pyłu oraz wydłużeniem trwałości, zwłaszcza stalowych elementów turbin oraz rurociągów 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].

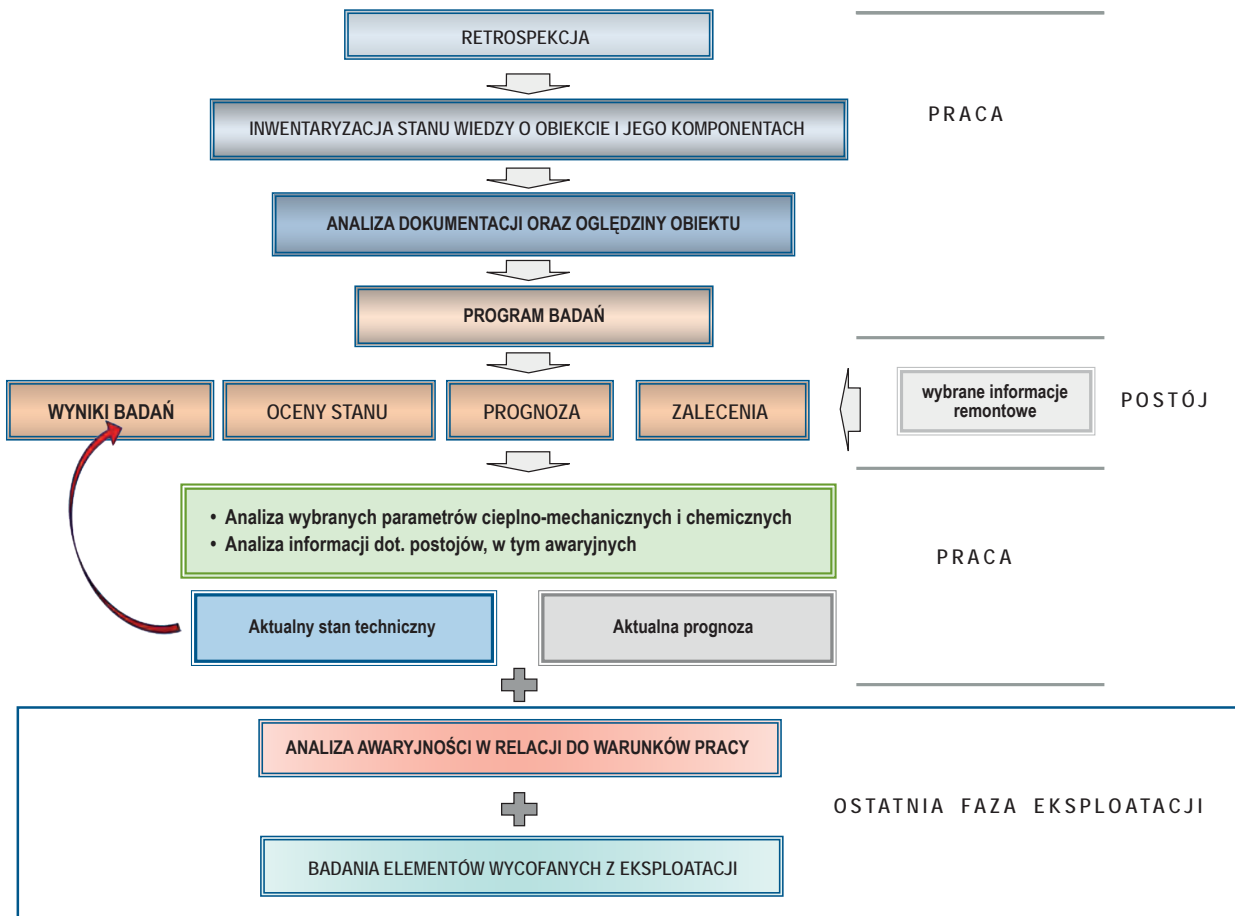
## **DIAGNOSTYKA JAKO SYSTEM ZINTEGROWANY Z EKSPLOATACJĄ URZĄDZENIA**

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 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



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

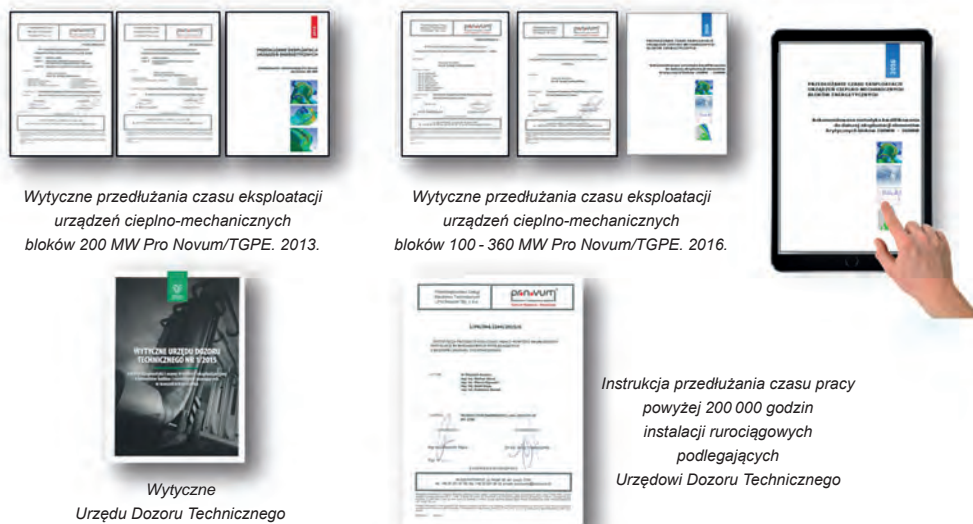


Rys. 2. Zdalna diagnostyka w formie wieloletniego serwisu LM Serwis PRO+®, zapewniająca automatyczną aktualizację oceny stanu technicznego i prognozy trwałości; zrealizowana na Platformie LM System PRO+®

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 wy-

branych metod AI, w tym zwłaszcza machine learning (rys. 6). LM System PRO+® to zaimplementowane w formie software'u „Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-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 rezerwu.

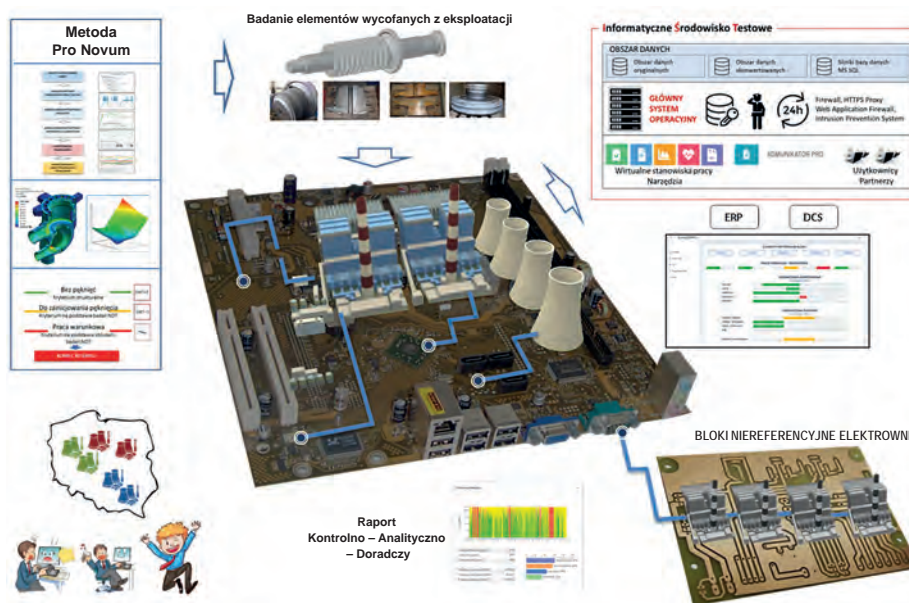


Rys. 3. Standaryzacja oceny stanu technicznego bloków 100-360 MW, w tym bloków klasy 200 MW oraz przykład integracji „Wytycznych...” Pro Novum oraz „Wytycznych...” UDT w formie Instrukcji przedłużania czasu pracy instalacji rurociągowych

Trudno jednoznacznie wyjaśnić, dlaczego ta atrakcyjna pod każdym względem forma wykonywania diagnostyki nie tylko nie stała się obowiązującym standardem, ale wydaje się, że wtedy 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 niskiemisyjnych może mieć istotne znaczenie (rys. 4).



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

## 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/grubościennych 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 również 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. Złóżczyca 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+<sup>®</sup> 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 jako-

ści 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 ciepło-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 intensywnej 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+<sup>®</sup> [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. Atrakcyjność 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, umożliwiają 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.

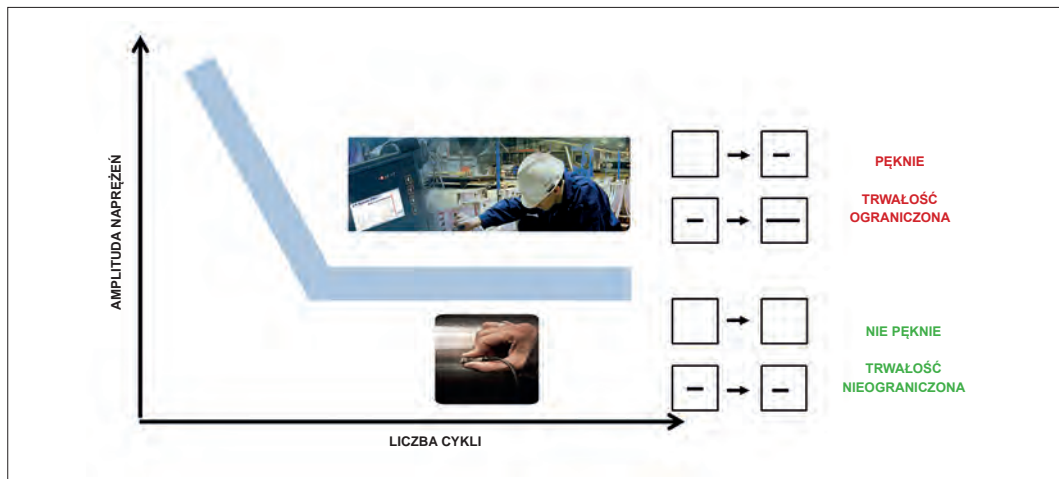
Historia, nie tylko polskiej energetyki, jest pełna przykładów, gdy wady technologiczne (np. niektórych wytopów stali, spoin, odlewów stalowych) identyfikowane były i nadal się je wykrywa w różnych fazach eksploatacji urządzeń, niekiedy od ich pierwszego uruchomienia i śledzi się (śledziło) ich zachowanie 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 własnościach 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



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

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.

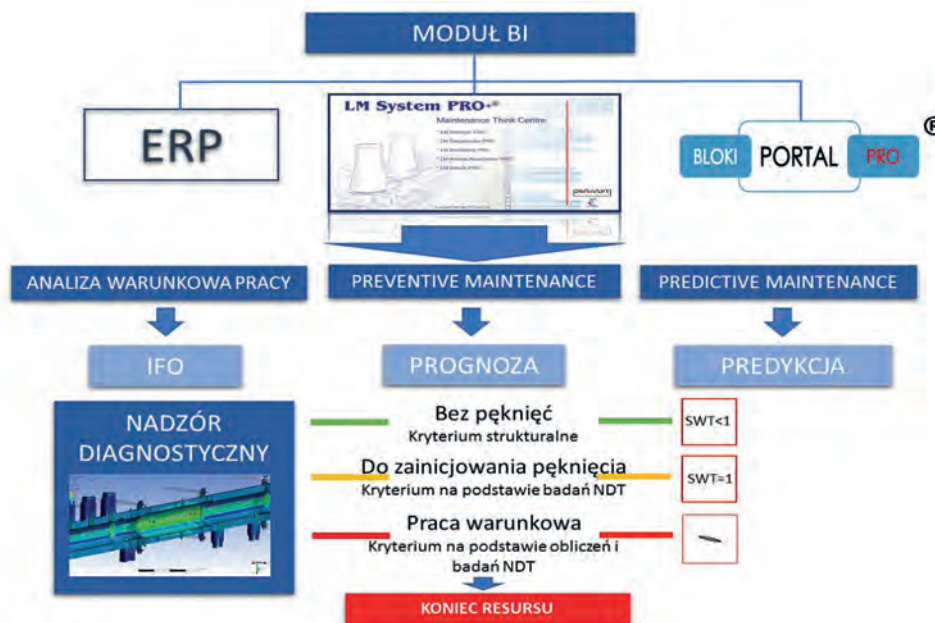
W ostatniej fazie eksploatacji będziemy mieli, już mamy, do czynienia przede wszystkim z uszkodzeniami o charakterze zmęczeniowym. Identyfikację miejsc ich występowania można wykonywać przy pomocy badań NDT, ale także analitycznie, tj. analizując w odpowiedni sposób pracę bloku, urzą-

dzenia 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”.

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



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

on-line, monitoruje się głębokość pęknięć oraz gdy to jest konieczne, okresowo sprawdza się rozmiary pęknięć dobierając, odpowiednie 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. Własności 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.

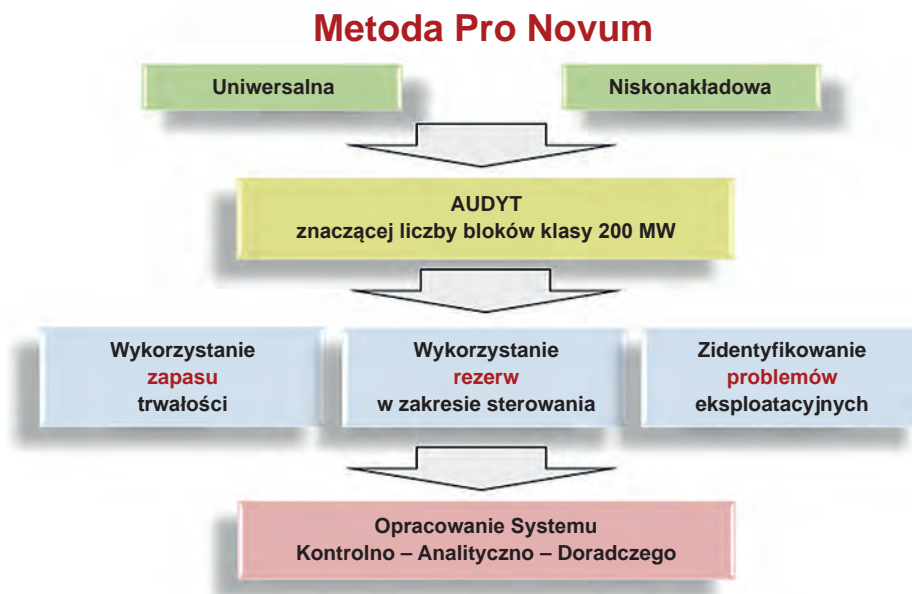
## DIAGNOSTYKA ŹRÓDŁEM WIEDZY DLA POPRAWY ELASTYCZNOŚCI

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 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





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

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 wyťažonej 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 zagrożeniach. 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 meto-

dy 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 termomechanicznych, 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.

## LITERATURA

- [1] Trzszczyński J., Trzszczyńska 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] Trzszczyński J., Trzszczyńska E., *Diagnostic as a source of knowledge and strategy for units of coal flexible fired power plants*. „VGB PowerTech” 2020, No 9.
- [3] Trzszczyński J., *Concept and Present State of Implementation of LM System PRO® – the System Supporting Maintenance of Thermo-Mechanical Power Equipment*. 3<sup>rd</sup> ETC Generation and Technology Workshop “Life Time Management of Pressurized Equipment”, Dublin 2007.
- [4] Trzszczyński J., Stanek R., Szyja R., Staszalek 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] Trzszczyński J., Stanek R., Rajca S., Staszalek 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., Trzszczyński 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] Trzszczyński 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] Trzszczyński J., *Diagnostyka 4.0 wspierająca przedłużanie eksploatacji bloków 100 MW – 360 MW*. „Dozór Techniczny” 2017, nr 4.
- [10] Trzszczyński J., *Aktualny stan techniczny oraz możliwości dalszej eksploatacji konwencjonalnych źródeł wytwórczych*. Monografia II Kongresu Elektryki Polskiej, tom II, grudzień 2014 - wrzesień 2016.
- [11] Trzszczyński 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., Trzszczyński 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] Trzszczyński 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] Trzszczyński J., *System diagnostyczny zapewniający bezpieczną pracę bloków 200 MW eksploatowanych po przekroczeniu 300 000 godzin*. „Dozór Techniczny” 2012, nr 2.
- [19] Trzszczyński J., *Bloki klasy 200 MW dziś i jutro*. „Energetyka” 2020, nr 6, *Biuletyn Pro Novum* 1/2020.

Niniejszy artykuł ukazał się w nr 12/2020 „Energetyki”, *Biuletyn Pro Novum* 2/2020. Publikacja za zgodą redakcji.