

Biuletyn

nr 1/2020

**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,

Epidemia uzmysłowia nam, że żyjemy w zglobalizowanym świecie. Rozwinięty system powiązań generuje problemy o charakterze domina. Narodowe, w większości, systemy elektroenergetyczne zareagowały spadkiem produkcji energii elektrycznej. Na początku kwietnia bieżącego roku średni, dzienny poziom emisji dwutlenku węgla był na świecie o ok. 17% niższy od przeciętnego zanotowanego w 2019 r. W poszczególnych krajach redukcja emisji sięgała ponad 30%, we Francji wyniosła nawet 34%. Prawie połowa spadku związana była z ograniczeniem transportu naziemnego.

W energetyce redukcja wyniosła tylko 7,4%. Pandemia empirycznie pokazała, że źródłem CO₂ jest nasza cywilizacja, a energetyka służy zaspokajaniu tylko części jej potrzeb. Skutki gospodarcze, może także społeczne pandemii mogą okazać się wysokie. Część prasy europejskiej, w tym polskiej, zdaje się przekonywać, że jakkolwiek duża miałyby być gospodarcza zapasność na drodze do bezemisyjnej energetyki nie może być żadnych opóźnień. Źródła spalające węgiel, zwłaszcza „koszmarnie przestarzałe i trujące na potęgę” powinny jak najszybciej zostać zastąpione jednostkami spalającymi gaz ziemny, a ten z kolei powinien być zastępowany przez gaz syntezowy, biogaz i wodór. Jeśli pozwolenia na emisję wzrosną do 50 euro, a nawet do 76 euro (!) to wszystko będzie się opłacało spalać z wyjątkiem węgla, a także gazu ziemnego. Ten ostatni to „paliwo przejściowe”, góra na kilkanaście lat. Czy to wszystko da się zrealizować? Agencja MAE przekonuje, że tak, wystarczy przeznaczyć 3 bln dolarów w ciągu trzech lat. To, że globalne zadłużenie jest aktualnie bardzo wysokie i coraz szybciej rośnie wydaje się nie przeszkadzać. Ucieczka do przodu bywa dobrą strategią, jeśli nie straci się z pola widzenia zdrowego rozsądku.

W Polsce zapowiedziano transformację sektora elektroenergetycznego. Jak ogólnie informuje prasa „brudne” aktywa mają zostać oddzielone od „czystych”. Zakładając, że eliminacja tych pierwszych jeszcze trochę potrwa, proponujemy Państwu lekturę artykułów, które zwłaszcza zwolennikom OZE, do których także się zaliczamy, mogą pomóc zrealizować scenariusz realistyczny dla naszego energetycznego sektora. Miejmy nadzieję, że to się dokona ze znaczącym udziałem polskich inżynierów, dostawców technologii i biur projektowych.

Jerzy Trzeszczyński & Jerzy Dobosiewicz

Artykuł powstał na podstawie referatu wygłoszonego podczas Seminarium SEP „Energetyka wczoraj i dziś”, zorganizowanego w dniu 29 stycznia 2020 roku w Katowicach przez Oddział Zagłębia Węglowego SEP oraz Pro Novum, związanego bezpośrednio z jubileuszem 80-lecia Tomasza Kołakowskiego, redaktora naczelnego „Energetyki” w latach 2000-2016, Któremu ten artykuł dedykuję.

Dr inż. Jerzy Trzeszczyński

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

Bloki klasy 200 MW dziś i jutro

Power unit class 200 MW today and tomorrow

Długa eksploatacja bloków klasy 200 MW to czas, który pozwolił na zdobycie pełnej wiedzy na temat ich konstrukcji, technologii wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej oraz utrzymania stanu technicznego. Udane na ogół modernizacje i odpowiednia jakość diagnostyki i remontów sprawiły, że ich bezpieczeństwo i akceptowalna dyspozycyjność nie są zagrożone. Te z nich, które będą w dobrej kondycji technicznej i poprawią swoją elastyczność odniosą sukces na Rynku Mocy. Mogą być eksploatowane jeszcze – w zależności od jakości bieżącego utrzymania technicznego – przez paręnaście lat, może tak długo aż znajdzie się dla nich dobra alternatywa.

Słowa kluczowe: bloki klasy 200 MW, diagnostyka i remonty, długa eksploatacja bloków

Long time operation of power units class 200 MW is the time that enabled acquiring of full knowledge about their design, electricity and heat generation technology and maintenance. Generally successful modernizations and adequate quality of diagnostics and renovations meant that their safety and acceptable availability are not compromised. Those of them that are in good technical condition and improve their flexibility will be successful on the Capacity Market. They can still be operated, depending on the quality of the current technical maintenance – for a dozen or so years, maybe as long as a good alternative is found for them.

Keywords: power units class 200 MW, diagnostics and renovations, long time operation of power units

Bloki klasy 200 MW posiadają specjalny status od prawie 50 lat. Zostały bowiem zaprojektowane i zbudowane zgodnie z określoną wizją systemu elektroenergetycznego w Polsce zapewniającą niezależność energetyczną z możliwością eksportu energii oraz wysokiej jakości miejsca pracy u polskich dostawców wszystkich głównych urzędów, a także w biurach projektowych, firmach remontowych i diagnostycznych, instytucjach oraz uczelniach technicznych. Konstrukcja ich nie była wprawdzie oryginalna, ale została w sposób istotny zmodyfikowana, ulepszona i dostosowana do potrzeb KSE. Know-how było przez długie lata w całości polskie, dopiero modernizacje wykonywane począwszy od lat 90-tych poprzedniego wieku sprawiły, że na blokach klasy 200 MW pojawiły się rozwiązania dostawców zagranicznych. Bloki klasy 200 MW, w znaczącej liczbie, eksploatują także zagraniczni użytkownicy. Polskie firmy wykonują nadal niektóre prace związane z utrzymaniem ich stanu technicznego oraz modernizacjami, zwłaszcza wydłużającymi czas eksploatacji.

Trudno znaleźć słabe strony bloków klasy 200 MW, stąd ich regres w polskim systemie elektroenergetycznym jest powolny i chyba jeszcze długo potrwa. Ich udział zarówno w rynku mocy jak i energii będzie się nadal zmniejszał za sprawą nowych jednostek wytwórczych, niekoniecznie jednak od nich bardziej atrakcyjnych dla KSE. Najdłużej na rynku pozostaną te z bloków 200 MW, które spełnią wymagania BAT Conclusions, znajdują się na Rynku Mocy oraz będą bezpieczne i dyspozycyjne pracując w coraz bardziej nietypowych warunkach, elastycznie dostosowując się do wymagań Operatora.

Biznes i klimat

Bloki węglowe mają się dobrze, zwłaszcza w świecie. Wszędzie tam, gdzie nie są „karane” rosnącymi kosztami zakupu uprawnień do emisji CO₂ generują najtańszą energię. Państwa, w których udział energetyki węglowej jest duży, jeśli deklarują znaczący rozwój generacji z OZE, podają odległe terminy, na ogół po 2030 roku. Najwięksi światowi emitenci CO₂ w ogóle nie składają takich deklaracji, a obecnie zwiększają produkcję energii z węgla, stąd wielkość emisji CO₂ nadal rośnie, a kolejne konferencje klimatyczne, w tym ostatnia w Madrycie, kończą się deklaracjami ... odsuwającymi konkretne zobowiązania do kolejnych konferencji klimatycznych. W świecie, a nawet w Europie oddaje się do użytku nowe bloki węglowe. Robią to nawet państwa, które importują węgiel kamienny.

Unia Europejska za 30 lat ma być neutralna klimatycznie. Oznacza to m.in. całkowitą dekarbonizację sektora energetycznego. To idealistyczny projekt, zakłada bowiem solidarne działanie, w tym samym kierunku, pozostałych państw świata, zwłaszcza największych emitentów CO₂. Zakłada, że w tym czasie zostaną rozwiązane wszystkie istotne problemy techniczne związane z dużym udziałem w systemach elektroenergetycznych niestabilnych źródeł energii, zwłaszcza efektywne magazynowanie energii wiatrowej i fotowoltaicznej. Podobnie jak Polska od Unii Europejskiej, tak również Unia Europejska od reszty świata oczekuje akceptacji idei „sprawiedliwej” transformacji, gdyż bez zapowiadanego cła węglowego unijny przemysł nie sprostą światowej konkurencji. Jego wprowadzenie natomiast może grozić eskalacją konfliktów handlowych.

Media słusznie informują o kolejnych sukcesach technologii OZE, prawie nie relacjonują o problemach, np. w Wielkiej Brytanii, która posiadając bardzo zdwersyfikowaną elektroenergetykę i doskonałe warunki eksploatacji offshore'owych farm wiatrowych nie ustrzegła się blackoutu w sierpniu ubiegłego roku [24].

Należy mieć nadzieję, że decyzje o wyłączeniu z eksploatacji, a zwłaszcza o likwidacji bloków 200 MW podjęte zostaną wtedy, gdy będzie wiadomo czym je zastąpić, najlepiej wtedy, gdy alternatywę dla nich będzie można zobaczyć w zaawansowanej realizacji.

Stare czy długo eksploatowane?

Bloki klasy 200 MW stanowią ciągle dużą część KSE (rys. 1), w tym także źródeł o statusie JWCD bezpośrednio zarządzanych przez Operatora. Ich atrakcyjność polega nie tylko na tym, że zajmują znaczące miejsce na rynkach mocy i energii, ale także dlatego, że nadają się wyjątkowo dobrze do stabilizacji KSE, zarówno przez ich liczbę, jak również przez techniczne dyspozycje, które nadal można poprawiać.

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 (tab. 1). Ich aktualna kondycja techniczna jest na tyle wysoka, że spełniają wymagania: dyrektywy IED 2010/75/EU, Operatora oraz Urzędu Dozoru Technicznego, a większość z nich spełni wymagania BAT Conclusions, które zaczną obowiązywać od lipca 2021 roku. Ich dyspozycyjność oraz koszty utrzymania są na akceptowalnym poziomie. Uwzględniając wyżej opisane cechy bloków klasy 200 MW bardziej adekwatnym określeniem dla nich wydaje się „długo eksploatowany” niż „stary”. Zagrożeniem dla nich mogą być w większym stopniu zmniejszające się kompetencje obsługi, tryb i jakość eksploatacji oraz utrzymania stanu technicznego niż naturalne wyczerpanie trwałości.

Liczne modernizacje sprawiły, że w ostatnim okresie pracy 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). Nadal można podtrzymać prognozę 350 tys. godzin pracy jako czas ich eksploatacji bez wymiany [1-8]. Wy-

miana informacji pomiędzy użytkownikami bloków 200 MW i systemy diagnostyczne powinny to uwzględniać monitorując odpowiednio warunki pracy oraz rejestrując wyniki badań, a zwłaszcza stany awaryjne i ważne dla oceny stanu technicznego informacje remontowe [15-20,22].

Ważnym atutem bloków klasy 200 MW jest ich konstrukcja, umożliwiającą przedłużanie trwałości głównych elementów grubościennych (krytycznych) znacznie ponad czas projektowy – aktualnie przyjmuje się, że do ok. 350 000 godzin – przy zastosowaniu regeneracji i rewitalizacji, których koszty nie przekraczają 30% ceny nowego elementu [8]. Podstawowe informacje dotyczące bloków 200 MW przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Ogólna charakterystyka bloków 200 MW oraz prawdopodobny scenariusz ich dalszej eksploatacji

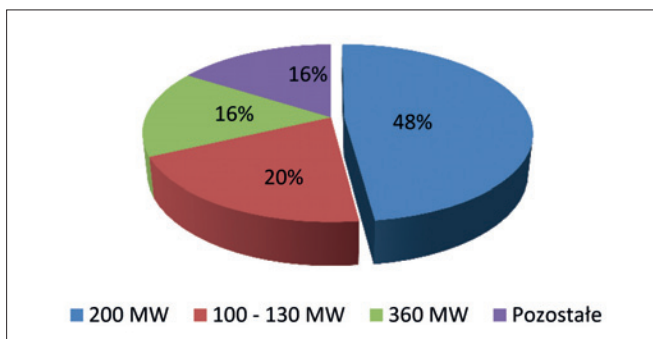
Charakterystyka bloków 200 MW	
Czas pracy	220 000 - ok. 300 000 godz.
Sumaryczna liczba uruchomień	1100 - 1600
Moc maksymalna	ok. 240 MW (proj. 220 MW)
Minimum techniczne	110 - 160 MW (proj. 130 MW)

Planowany czas dalszej eksploatacji	
Czas pracy	ok. 350 000 godz. (do ok. 2035 r.)
Sumaryczna liczba uruchomień	ok. 3000
Scenariusz dalszej eksploatacji:	
- podstawowe (P)	4500 godz./rok – 4500 MW
- regulacyjno-rezerwowe (RR)	1500 godz./rok – 2500 MW
- rezerwowe (RZ)	300 godz./rok – 3000 MW

Diagnostyka źródłem wiedzy i strategii

Diagnostyka bardzo często bywa źródłem informacji, rzadziej źródłem wiedzy istotnej dla remontu i eksploatacji, jeszcze rzadziej strategii [28]. Źródłem wiedzy może być tylko wtedy, gdy program badań wynika z retrospekcji, a na podstawie wyników badań wykonuje się ocenę stanu technicznego. Strategię na podstawie diagnostyki można kreować wtedy, gdy potrafimy przedstawić prognozę trwałości oraz predykcję awarii. Można to osiągnąć traktując diagnostykę jako proces zintegrowany z eksploatacją oraz nadając odpowiednio wysoki status analizie awaryjności i warunków pracy oraz badaniom, zwłaszcza niszczącym, elementów wycofanych z eksploatacji.

GRUPA ENERGETYCZNA	LICZBA BLOKÓW KLASY 200 MW
TAURON Wytwarzanie SA	10
ENERGA Elektrownie Ostrołęka SA	3
PGE Energia Ciepła SA	8
PGE GiEK SA	6
ZE PAK SA	6
ENEA Wytwarzanie Sp z o.o.	8
Enea Elektrownia Połaniec SA	7
RAZEM:	48



Rys. 1. Użytkownicy bloków klasy 200 MW i ich miejsce w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym

Duża liczba bloków energetycznych tej samej klasy to atut, który trudno przecenić. Sprzyja szybkiemu zdobyciu wiedzy i doświadczeń zarówno w trybie klasycznym jak i z wykorzystaniem metod AI. *Transfer learning* przebiega efektywnie zwłaszcza wtedy, gdy badania i ocena stanu wykonywane są według jednokowych metod i standardów. W tym celu w 2013 roku opracowano „Wytyczne przedłużania eksploatacji...” (rys. 2) [10-12], a rok później udostępniono użytkownikom bloków klasy 200 MW Portal Bloki PRO® umożliwiający powiązanie bieżącego stanu technicznego bloku, a zwłaszcza jego dyspozycyjności, z warunkami pracy oraz kosztami maintenance’u. [19] Program posiada wersję bezobsługową, automatycznie generuje raporty dla poszczególnych bloków, jak również okresowe wspólne raporty przy zachowaniu pełnej anonimowości informacji. „Wytyczne przedłużania eksploatacji...” opracowane przez *Pro Novum*, przy wsparciu specjalistów z elektrowni, uzupełniają, poszerzają i aktualizują dostępne na polskim rynku standardy badania i oceny stanu technicznego urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni [10-12]. Część standardów poprzedzających wydanie „Wytycznych...” opracowywana była także z udziałem specjalistów *Pro Novum* [13,14]. „Wytyczne...” *Pro Novum* zostały zaimplementowane na Platformie Informatycznej LM System PRO+®, której pierwsza wersja powstała w 2004 roku. Platforma w formie programu LM Serwis PRO® została zainstalowana na 19-tu blokach 200 MW oraz 10-ciu kotłach bloków 360 MW i na bloku 858 MW [15-20,22].

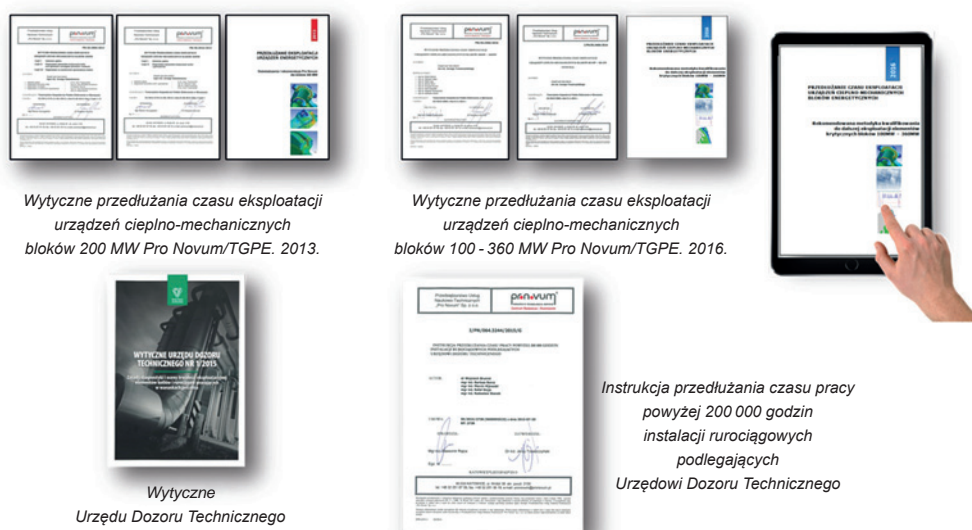
Najbardziej zaawansowana wiedza z diagnostyki może być źródłem strategii eksploatacji, utrzymania technicznego oraz modernizacji. Redukować nakłady na utrzymanie stanu technicznego, wykonywać niskonakładowe modernizacje, przystosowywać urządzenia do nietypowych warunków eksploatacji bez ryzyka utraty bezpieczeństwa i dyspozycyjności, można tylko wtedy, gdy dysponuje się wysokiej jakości wiedzą o aktualnym stanie technicznym urządzeń.

Wiedza ma największą wartość, gdy jest udokumentowana. Klasyczne techniki badań NDT na ogół wystarczają, żeby z-

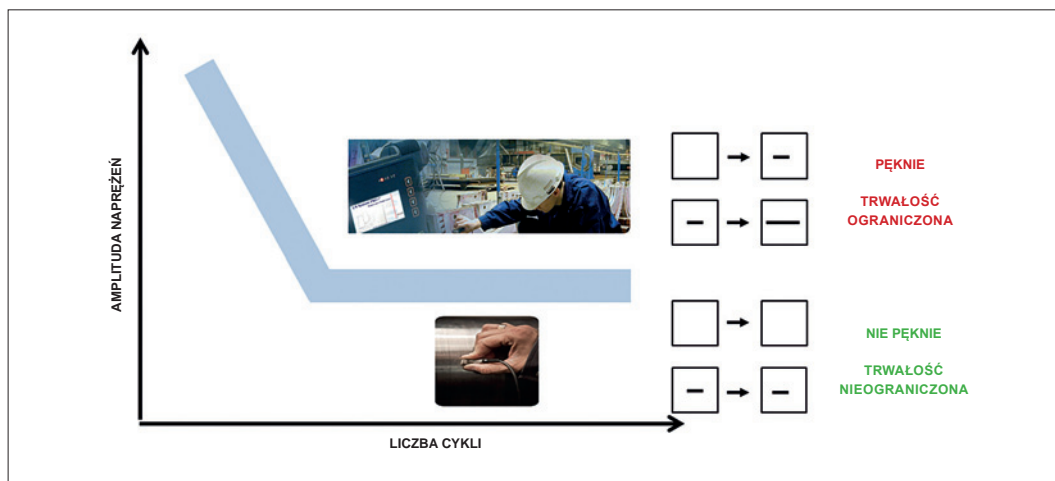
dentyfikować rzeczywisty problem. Bardzo rzadko trzeba obraz mocno powiększać i poszukiwać alternatywnych w stosunku do metody UT technik obserwacji wnętrza elementu. Znaczna część tego rodzaju działań jest nieistotna z praktycznego punktu widzenia. Generuje bowiem najczęściej zbędne koszty, a co gorsza utrudnia prawidłową interpretację wyników badań i pomiarów. Historia wdrażania w energetyce technik Phased Array i ToFD dobrze to potwierdza.

Jednym z niedocenianych sposobów zdobywania wiedzy jest analiza awarii. Korzyści z niej, zwłaszcza w postaci odpowiednio integrowanej wiedzy z różnych obiektów tej samej klasy, bywają większe niż ze standardowych badań i pomiarów, zwłaszcza wtedy, gdy ich program i zakres ma „przesiewowy” charakter. Ilość bowiem rzadko przechodzi w jakość, bywa, że utrudnia jej osiągnięcie. Można wykonać badania np. metalograficzne w paru tysiącach miejsc na jednym bloku nie identyfikując istotnych problemów dotyczących jego bezpiecznej eksploatacji. Analiza awarii, jeśli kończy się określeniem zarówno jej przyczyny bezpośredniej jak i pośredniej, dostarcza nie tylko wysokiej jakości wiedzy diagnostycznej, ale prowadzi do wyeliminowania lub ograniczenia problemu, który ją spowodował. To korzyść, której często nie doceniają, może nie rozumieją entuzjaści od predykcji awarii, a zwłaszcza admiratorzy remontów „awaryjno-planowych”. Nie deprecjonuje to w żadnym przypadku metod sztucznej inteligencji i zaawansowanej analityki jako silnych narzędzi taniego i szybkiego zdobywania oraz poszerzania wiedzy. Udać się to jednak tylko wtedy, gdy podstawę stanowi bardzo silna wiedza ekspercka. Kompetentny, z techniczną wyobraźnią data scientist powinien współpracować ze specjalistą branżowym o dużej wiedzy oraz umiejętności przekazywania jej istotnego sensu. To nadal trudny do spełnienia warunek.

Wiedzę trzeba nie tylko posiadać, ale ją także stosować i pamiętać, że wiedza nie zawsze uzyskuje powszechną akceptację, bywa związana z biznesowym interesem tego, kto ją posiada [21].



Rys. 2. Standaryzacja oceny stanu technicznego bloków 100-360 MW, w tym bloków klasy 200 MW. Podejście *Pro Novum*, Urzędu Dozoru Technicznego oraz przykład integracji „Wytycznych...” w formie Instrukcji przedłużania czasu pracy instalacji rurociągowych



Rys. 3. Wady technologiczne w warunkach ograniczonej i nieograniczonej trwałości zmęczeniowej

Problemy rzeczywiste i teoretyczne

Wszystkie istotne problemy dotyczące bezpieczeństwa i dyspozycyjności bloków klasy 200 MW, zwłaszcza ich oryginalnych urządzeń, węzłów konstrukcyjnych i elementów są od dawna znane [1-8]. Znane są także sposoby ich niskonakładowego rozwiązywania. Uzupełnienia wymaga wiedza dotycząca możliwych negatywnych skutków pracy regulacyjnej, zwłaszcza w intensywnej jej wersji. Problemy rzeczywiste znane są od dawna. Istnieje także wiedza i doświadczenie pozwalające na ich rozwiązywanie. „Problemy teoretyczne” pojawiają się co jakiś czas, w miarę jak na rynku pojawiają się nowi specjaliści o małym doświadczeniu remontowym i diagnostycznym, „innovacyjne” metody badania, pomiarów i analizy wyników, niedostatecznie zweryfikowane w praktyce narzędzia, np. AI, które potencjalnie mogą przynieść konkretne korzyści.

Od czasu do czasu identyfikowane są „problemy” mające swoje źródło w nowych (innovacyjnych) technikach badawczo-pomiarowych oraz prawnej nadinterpretacji. Nowe techniki pomiarowe wymagają wielu lat doświadczeń i nie zwalniają od logicznego myślenia.

Za przykład może posłużyć identyfikacja stopnia wyczerpania trwałości elementu, która w rzeczywistości prosta, może przybrać formy skomplikowanych procedur, mogących generować nie tylko teoretyczne problemy, ale także zbędne koszty. Wyniki badań, zwłaszcza publikowane, nie wskazują m.in. na potrzebę rewitalizacji płaszczy walczków (jeśli przez rewitalizację rozumieć regenerację struktury) ani na korzyści z tzw. nisko-temperaturowej rewitalizacji elementów stalowych turbin.

Co najmniej kontrowersyjna wydaje się potrzeba wymiany spoin, które nie spełniają aktualnych wymagań jakościowych, a którym nie towarzyszą uszkodzenia o charakterze eksploatacyjnym. Wynika to z prostej analizy, którą schematycznie przedstawiono na rysunku 3. Wymieniając dużą liczbę spoin na rurociągach pracujących w warunkach pełzania można stworzyć sobie większy problem niż ten, który wcześniej zidentyfikowano. Nie zawsze bierze się pod uwagę fakt, że pełzanie to proces bardzo długotrwały, na większości eksploatowanych elementów nieujawniony w niebezpiecznej formie nawet po przepracowaniu 250 tys. godzin (jeśli eksploatacji nie towarzyszyły znaczące

nieprawidłowości) oraz że np. dalsze 10 lat eksploatacji bloku 200 MW może oznaczać ok. 20 tys. godzin pracy w warunkach pełzania. Warunkowa eksploatacja może dotyczyć także elementów eksploatowanych w warunkach pełzania.

Ważną klasą zagadnień są problemy dotyczące bezpieczeństwa technicznego całkiem rzeczywiste, ale trochę zapomniane lub niedoceniane:

- możliwość zniszczenia walczaka podczas próby ciśnieniowej, jeśli nie jest ona wykonywana zgodnie z przepisami UDT (Decyzja UDT DC 38/93 z dnia 16.12.1993),
- możliwość powstania nieszczelności od pęknięć korozyjno-zmęczeniowych na odcinkach rurociągów eksploatowanych w warunkach pełzania, ale okresowo pozostających pod ciśnieniem i bez przepływu pary,
- możliwość spowodowania awarii na skutek uszkodzenia kołpaków wirników generatorów oraz innych elementów turbinowych nasadzanych na skurcz – uszkodzenia korozyjno-naprężeniowe powstają i rozwijają się także podczas postojów bloku/urządzenia,
- możliwość awarii rurociągu wody zasilającej zwłaszcza takiego, który nigdy nie został zbadany w pełnym zakresie.

Poprawa elastyczności warunkiem przedłużenia eksploatacji

Dalsze pozostawanie w KSE bloków klasy 200 MW będzie uzależnione, w największym stopniu, od poprawy elastyczności jednostek wytórczych bez obniżenia ich bezpieczeństwa i dyspozycyjności oraz przy akceptowalnych (względnie niskich) nakładach na utrzymanie stanu technicznego. Oczekiwania te można spełnić zapewniając w pierwszym rzędzie wysokiej jakości maintenance. Wydaje się, że największe wyzwanie dotyczyć będzie uzyskania odpowiedniej jakości prac w obszarze turboszespołów. Wysokiej jakości kompetencje remontowe i diagnostyczne dla tych urządzeń nie da się łatwo i szybko odbudować, jeśli ciągłość transferu know-how zostanie mocno zakłócona, a zwłaszcza przerwana. Dużo do życzenia pozostawia także jakość eksploatacji, świadczą o tym wyniki badań turboszespołów w ostatnim czasie.

Elastyczność można poprawić niskonakładowo, często w znaczącym stopniu. Metoda poprawy elastyczności może być niskonakładowa i uniwersalna, podejście musi być jednak indywidualne. Efekt może być zróżnicowany w zależności od:

- zakresu wcześniejszych modernizacji bloku,
- aktualnego stanu technicznego,
- kompetencji obsługi – jakości eksploatacji.

Bezpieczeństwo i dyspozycyjność w ostatniej fazie eksploatacji

Urządzenia w końcowej fazie eksploatacji nie mogą być mniej bezpieczne niż wcześniej. Akceptowana dyspozycyjność urządzeń długo eksploatowanych nie może być dużo mniejsza niż nowych. Limitowane są natomiast, często bardzo agresywnie, nakłady na utrzymanie. W związku z powyższym *Pro Novum* opracowało i wdrożyło metodykę warunkowej pracy uszkodzonych elementów (rys. 4), których naprawa lub wymiana nie jest możliwa lub ekonomicznie akceptowalna [23].

Istotą podejścia *Pro Novum* jest założenie, że:

- bezpieczny zapas trwałości może być rozpatrywany także dla elementu uszkodzonego, posiadającego pęknięcie o charakterze zmęczeniowym, jeśli zgodnie z metodyką i kryteriami mechaniki pęknięcia rozmiary pęknięć są akceptowalne, a w materiale nie zidentyfikowano fizycznych uszkodzeń pęczaniowych oraz niedopuszczalnych deformacji;
- warunki pracy i rozmiary pęknięcia będą odpowiednio obliczeniowo monitorowane;
- okresowo będą wykonywane badania NDT w zakresie umożliwiającym weryfikację rozmiarów pęknięć, jeśli zaistnieje taka potrzeba.

W sposób jw. monitorowany jest stan techniczny wirnika generatora oraz ciśnieniowych elementów kotłów (komór przegrzewaczy pary i schładzaczy).

Warunkowa praca uszkodzonych elementów znana jest tak długo, jak istnieje energetyka. Metoda *Pro Novum*, poprzez analityczne podejście do problemu, istotnie poprawia bezpieczeństwo takiego działania oraz redukuje koszty utrzymania, zwłaszcza wtedy, gdy uszkodzony element nie może być naprawiony ze względów technicznych i/lub ekonomicznych.

Podsumowanie i wnioski

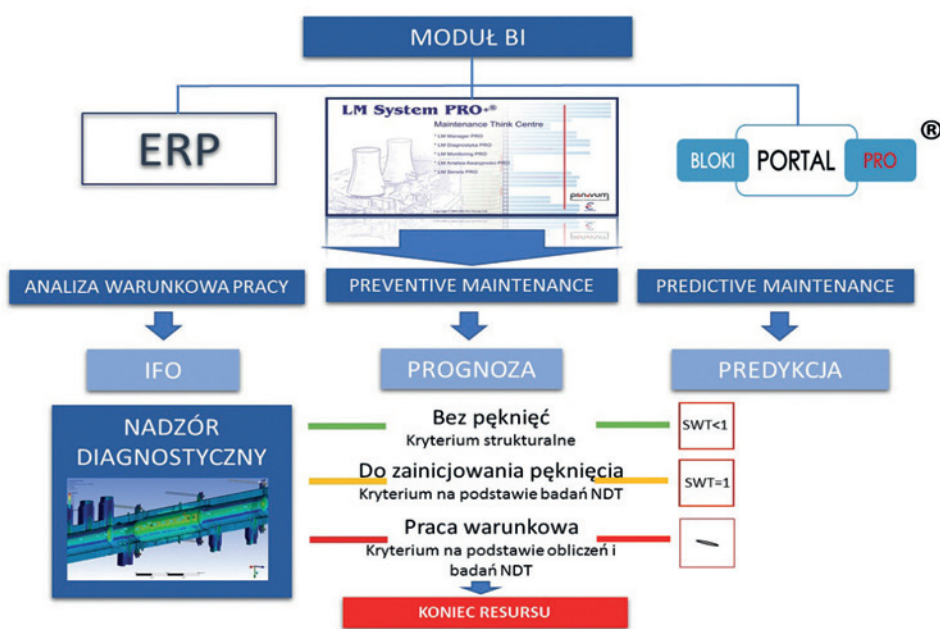
Zmodernizowane bloki węglowe, zwłaszcza o mocy 200 MW i 360 MW, to w energetyce zawodowej najtańsze i najbardziej elastyczne źródła energii, stanowiące znaczącą część KSE i podstawę bezpieczeństwa energetycznego. Większość z nich będzie spełniać wymagania BAT Conclusions w zakresie emisji, pozostałe eksploatowane w trybie podszczytowym i szczytowym oraz jako źródła rezerwowe będą „niskoemisyjne” jako jednostki eksploatowane maksymalnie 1500 godz./rok. Ich atrakcyjność i obecność w KSE można wydłużyć poprawiając niskonakładowo ich elastyczność. Obecność dużych bloków w KSE to jeszcze jedno potencjalne źródło niestabilności w przypadku ich awarii.

Atrakcyjność bloków klasy 200 MW powinni docenić także entuzjaści OZE. Ich naturalna elastyczność, jako rezultat dużej liczby bloków o prawie identycznych parametrach technicznych oraz predyspozycje do jej niskonakładowej poprawy sprawiają, że w KSE będzie można pomieścić większy wolumen generacji z OZE zanim pojawią się efektywne magazyny energii, bloki gazowe oraz infrastruktura gazowa zapewniająca warunki do ich elastycznej pracy, a przepustowość interkonektorów i jakość rynku energii w otoczeniu Polski sprawiają, że nasze KSE będzie co najmniej tak zielone jak naszych sąsiadów i tak zabezpieczone przed blackautem jak dotąd.

Bloki klasy 200MW, także te eksploatowane podszczytowo i szczytowo, mogą pozostać nadal bezpieczne i dyspozycyjne przy akceptowalnych kosztach:

- elementy krytyczne (grubościenne) kotłów, instalacji rurociągowych i turbozespołów mogą być eksploatowane

Rys. 4. Wykorzystanie zapasu trwałości elementów krytycznych bloku w zależności od trybu, warunków i strategii jego eksploatacji



bezpiecznie, bez potrzeby ich wymiany do ok. 350 tys. godzin i ok. 3000 uruchomień;

- trwałość elementów krytycznych może być dokładnie zdiagnozowana i prognozowana, a w razie potrzeby wydłużana z wykorzystaniem technologii, których skuteczność została wielokrotnie potwierdzona;
- elastyczność bloków może być poprawiona – prace nad niskonakładowymi, uniwersalnymi metodami są w zaawansowanym stadium realizacji;
- niewykluczone są modernizacje niektórych bloków w kierunku redukcji emisji poniżej poziomu 550 g CO₂/kWh;
- przez około 40 lat eksploatacji bloków klasy 200 MW powstała wiedza i doświadczenie pozwalające zapewnić im bezpieczeństwo i dyspozycyjność w kolejnym horyzoncie czasowym;
- należy zadbać o międzypokoleniową ciągłość kompetencji i odpowiednio wysoki poziom techniczny firm i instytucji zaplecza energetyki – wobec pogorszenia warunków eksploatacji wysoka jakość utrzymania technicznego powinna być zachowana, a w niektórych przypadkach przywrócona.

Podstawową bezpieczeństwa i dyspozycyjności jest dobry stan techniczny bloku. Diagnostyka powinna być źródłem wiedzy i strategii jego utrzymania oraz eksploatacji.

Wiedzę należy nie tylko posiadać, ale ją także praktycznie stosować, a kiedy potrzeba – to także jej bronić.

Bloki 200 MW mogą być bezpieczne i dyspozycyjne w kolejnym horyzoncie czasowym. W tym czasie można będzie zweryfikować zarówno realność europejskiego green deal'u, jak i – miejmy nadal nadzieję – opracować strategię dla polskiej energetyki na miarę naszych potrzeb, możliwości i ambicji.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Trzeczcyński J., *Eksploatacja urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni po przekroczeniu trwałości projektowej* – Rekomendacje i doświadczenia Pro Novum. „Nowa Energia” 2014, nr 1.
- [2] Dobosiewicz J., *Przydatność elementów kotła po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy*. „Energetyka” 1983, nr 8.
- [3] Trzeczcyński J., *Możliwości i warunki przedłużania czasu eksploatacji zrewitalizowanych elementów turbin parowych*. „Energetyka” 2011, nr 6. *Biuletyn Pro Novum* nr 1/2011.
- [4] Trzeczcyński J., *System diagnostyczny zapewniający bezpieczną pracę bloków 200 MW po przekroczeniu 300 tys. godz. eksploatacji*. „Dozór Techniczny” 2012, nr 2.
- [5] Trzeczcyński J., Stanek R., *Analiza awaryjności elementów krytycznych bloków 200 MW jako ważny element metodyki prognozowania trwałości*. „Energetyka” 2013, nr 6.
- [6] Trzeczcyński J., *Aktualny stan techniczny oraz możliwości dalszej eksploatacji konwencjonalnych źródeł wytwórczych*. Monografia II Kongresu Elektryki Polskiej, tom II, grudzień 2014 – wrzesień 2016.
- [7] Trzeczcyński J., *Doświadczenia i zamierzenia Pro Novum związane z przystosowaniem długoeksploatowanego majątku produkcyjnego elektrowni w Polsce do pracy w perspektywie do 2030 roku*. „Dozór Techniczny” 2016, nr 1.
- [8] Grzesiczek E., Trzeczcyński J., Rajca S., *Możliwości wydłużania czasu eksploatacji elementów części przepływowych turbin parowych*. „Energetyka” 2003, nr 12.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] PN/045.3360/2016: *Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 100-360 MW*. *Pro Novum*. Katowice 2016.
- [13] Instrukcja oceny stanu oraz kwalifikowania do wymiany komór, kolektorów, rurociągów kotłowych i głównych rurociągów parowych pracujących w warunkach peizania. MGIE. Warszawa 1986.
- [14] Dobosiewicz J., *Badania diagnostyczne urządzeń ciepłno-mechanicznych w energetyce*. Część I. *Zagadnienia ogólne*. Turbiny i generatory. Biuro Gamma. Warszawa 1998.
- [15] Trzeczcyński 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.
- [16] Trzeczcyński 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.
- [17] Trzeczcyński 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.
- [18] Trzeczcyński 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.
- [19] Stanek R., Trzeczcyński J., Dąbrowski M., *Diagnostyka jednego typu urządzeń w skali KSE z wykorzystaniem portalu internetowego integrującego informacje eksploatacyjne*. „Energetyka” 2017, *Biuletyn Pro Novum* 2/2017.
- [20] Trzeczcyński J., Trzeczcyńska 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.
- [21] Trzeczcyński J., *Designed in CHINA assembled in POLAND?* „Przegląd Energetyczny” 1/2014, nr 1.
- [22] Trzeczcyński J., *Diagnostyka 4.0 wspierająca przedłużanie eksploatacji bloków 100 MW – 360 MW*. „Dozór Techniczny” 2017, nr 4.
- [23] Trzeczcyński J., Murzynowski W., *Nadzór diagnostyczny nad warunkową eksploatacją uszkodzonych schładzaczy do czasu ich wymiany lub naprawy*. „Energetyka” 2019, nr 7, *Biuletyn Pro Novum* 1/2019.
- [24] *UK blackout – an accumulation of rare events*, “Modern Power Systems” 2019, 8 September.
- [25] Trzeczcyński J., *Bloki klasy 200 MW dziś i jutro*, „Śląskie Wiadomości Elektryczne” 2020, nr 2-3.

Zdalna diagnostyka – niewykorzystana szansa na niskonakładowe zapewnienie bezpieczeństwa i dyspozycyjności urządzeń energetycznych

Remote diagnostics – a wasted opportunity to ensure the safety and availability of power equipment at low costs

Zdalna diagnostyka posiada w polskiej energetyce ponad 15-letnią historię i możliwą, długą przyszłość. Nie tylko ze względu na doświadczenia pandemii powinna być intensywnie rozwijana zwłaszcza na długo eksploatowanych blokach tej samej klasy w końcowej części ich resursu. Nowym blokom, prawdopodobnie gazowo-parowym będzie towarzyszyła od początku ich eksploatacji. Pozwala zapewnić bezpieczeństwo i dyspozycyjność w niskonakładowy sposób na podstawie analizie w trybie on-line informacji oraz systematycznie powiększanej wiedzy i kompetencji personelu nie tylko wykonującego diagnostykę. Skojarzona z metodami zaawansowanej analityki oraz sztucznej inteligencji może być jednym ze źródeł strategii w zakresie zarządzania majątkiem produkcyjnym elektrowni.

Słowa kluczowe: urządzenia energetyczne, zdalna diagnostyka, bezpieczeństwo, dyspozycyjność

Remote diagnostics has over 15 years of history in the Polish power sector and a possible long future. Not only because of the experience of pandemic, it should be intensively developed, especially in long time operated power units of the same class, in the final part of their life cycle. New power units, probably gas and steam, will be accompanied by remote diagnostics from the beginning of their operation. It allows you to ensure safety and availability in a low-cost manner based on on-line analysis of information and systematically increasing knowledge and competences of personnel not only performing diagnostics. Associated with the methods of advanced analytics and artificial intelligence, it can be one of the sources of strategies for managing the production assets of a power plant.

Keywords: power equipments, remote diagnostics, safety, availability

Z powodów trudnych do racjonalnego wyjaśnienia zdalna diagnostyka urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni, zwłaszcza długo eksploatowanych, nie tylko nie stała się obowiązującym standardem, ale wydaje się, że wtedy gdy może w największym stopniu ujawnić swoje atuty oraz gdy może we względnie prosty sposób powiększać swoją funkcjonalność przez wykorzystanie zaawansowanej analityki oraz metod AI, znajduje się w regresie tam, gdzie została wdrożona. Czy doświadczenia z czasów epidemii odmienią tę sytuację trudno aktualnie przewidzieć. Nie one jednak są decydującym argumentem za tym, aby informacje, wiedzę i doświadczenia systematycznie rejestrować, odpowiednio przetwarzać i posiadać w formie zapewniającej komfort z jej korzystania. W okresie ograniczonych środków, słabnących kompetencji oraz nietypowych warunków eksploatacji, systemowo gromadzona informacja i na jej podstawie wiedza mogą stanowić trudne do przecenienia wsparcie dla bezpieczeństwa i dyspozycyjności jednostek wytwórczych, do czasu gdy upewnimy się, że zieloną rewolucję w energetyce uda się racjonalnie skojarzyć z kosztami inwestycji i wytwarzania oraz bezpieczeństwem energetycznym.

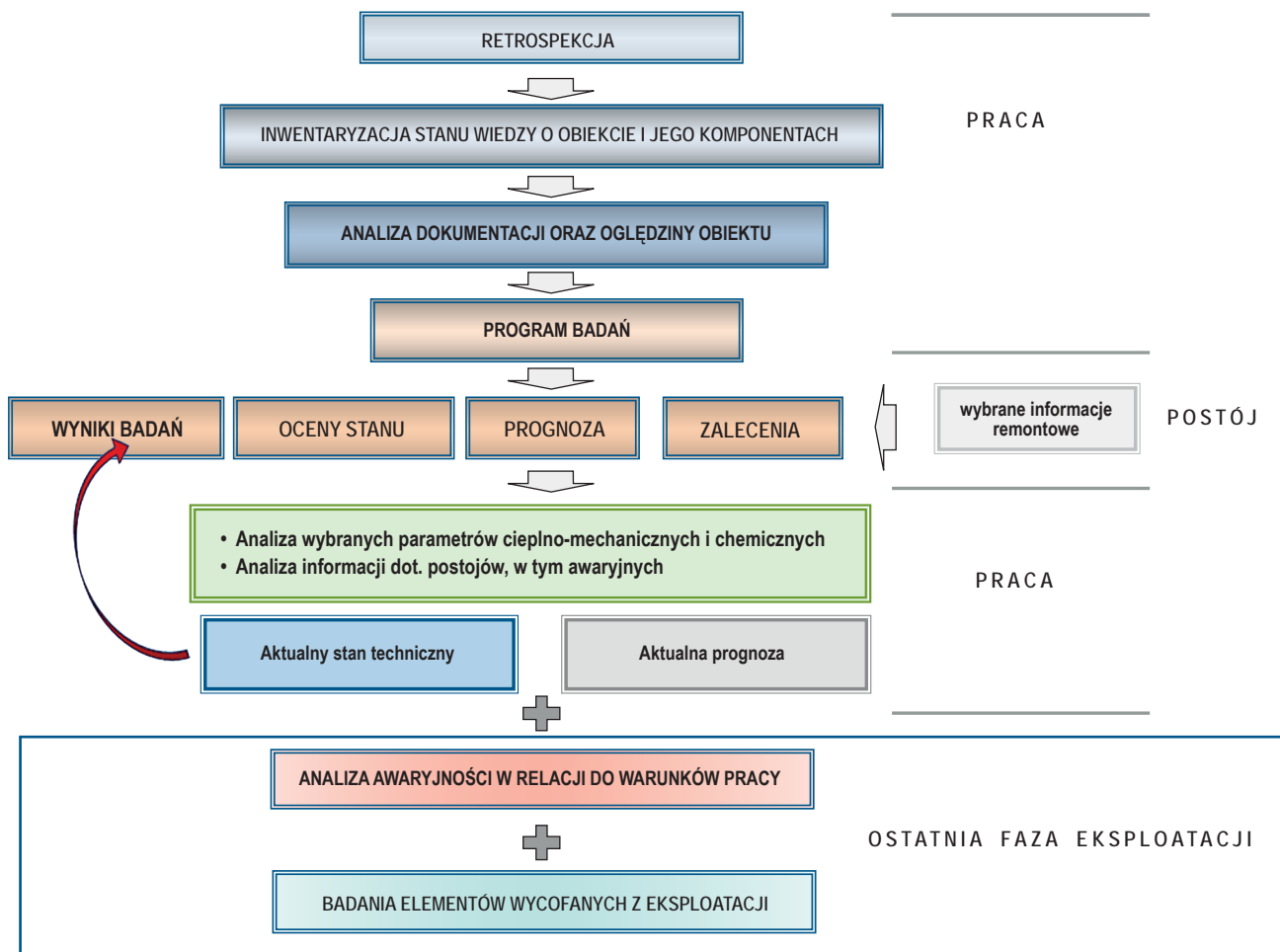
Zdalna diagnostyka – podstawowe informacje

Diagnostyka zdalna, podobnie jak diagnostyka klasyczna na podstawie okresowo wykonywanych badań i pomiarów w odpowiednim, wynikającym z retrospekcji zakresie, umożliwia ocenę stanu technicznego urządzenia/elementu oraz prognozę trwałości w odpowiednim do zastosowanej metodyki horyzoncie czasowym. Badania są więc jedynie częścią diagnostyki, a ich ilość nie musi przechodzić w jakość. Diagnostyka wymaga dostępu do źródeł danych i informacji wskazanych na rysunku 1.



Rys. 1. Dane i informacje niezbędne do wykonywania diagnostyki

Istotną cechą diagnostyki zdalnej jest potraktowanie jej jako procesu zintegrowanego z procesem eksploatacji urządzenia/bloku energetycznego (rys. 2), co stwarza warunki do bieżącej, automatycznej aktualizacji oceny



Rys. 2. System diagnostyczny działający zdalnie jako proces zintegrowany z eksploatacją, z uwzględnieniem specjalnego podejścia do bezpieczeństwa i dyspozycyjności w jej ostatniej fazie

stanu technicznego i weryfikacji prognozy trwałości. W ten sposób można sprawować nadzór diagnostyczny nad stanem technicznym elementu, węzła konstrukcyjnego oraz urządzenia/instalacji, a nawet bloku energetycznego w trybie *on-line*. Warunkiem jest odpowiednie dokumentowanie i rejestrowanie wyników badań wykonywanych podczas postoju urządzenia oraz zaimplementowanie w formie software'u wszystkich procedur diagnostycznych.

Od wytycznych przedłużania eksploatacji do systemów nadzorujących bieżący stan techniczny urządzeń

Aplikacja realizująca zdalną diagnostykę stała się źródłem inspiracji dla opracowania wielu specjalistycznych modułów, które pozwalały zarówno na autonomiczną realizację jej poszczególnych funkcji, np. analizy historii i warunków eksploatacji, jak również poszerzały jej możliwości dodatkowej analizy awaryjności, dyspozycyjności, niezawodności, planowania diagnostyki i remontów, etc. W ten sposób powstała Platforma Informatyczna LM System PRO+®. Największe komercyjne sukcesy osiągnął jeden z jej modułów LM Serwis PRO+® wdrożony

na wielu urządzeniach i blokach o mocy od 50 MW do 858 MW. Udział *Pro Novum* w Programie Bloki 200+ stworzył warunki do kolejnej fazy jej rozwoju z wykorzystaniem technologii Digital Twins oraz wybranych metod AI, w tym zwłaszcza machine learning (rys. 8).

Podstawą każdej diagnostyki, w tym także zdalnej, powinny być standardy badania i oceny stanu technicznego. Najlepiej zostały one opracowane dla bloków klasy 100 MW, 200 MW i 360 MW (rys. 3, 4).

Duża liczba bloków energetycznych tej samej klasy to atut, który trudno przecenić. Sprzyja szybkiemu zdobyciu wiedzy i doświadczeń zarówno w trybie klasycznym jak i z wykorzystaniem metod AI. *Transfer learning* przebiega efektywnie zwłaszcza wtedy, gdy badania i ocena stanu wykonywane są według jednakowych metod i standardów. W tym celu w 2013 roku opracowano „Wytyczne przedłużania eksploatacji...” (rys. 5) [1], a rok później udostępniono użytkownikom bloków klasy 200 MW, Portal Bloki PRO® umożliwiający powiązanie bieżącego stanu technicznego bloku, a zwłaszcza jego dyspozycyjności, z warunkami pracy oraz kosztami maintenance'u. „Wytyczne przedłużania eksploatacji...” opracowane przez *Pro Novum*, przy wsparciu specjalistów z elektrowni, uzupełniają, poszerzają i aktualizują dostępne na polskim rynku standardy badania i oceny stanu technicznego urządzeń

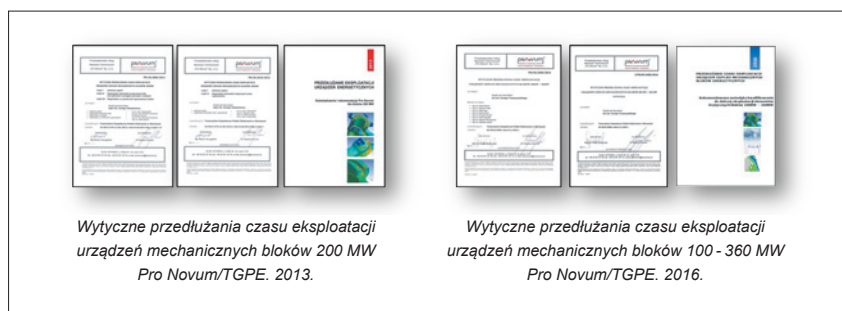


Rys. 3. Zdalna diagnostyka – automatyczna aktualizacja oceny stanu technicznego i prognozy trwałości

Rys. 4. Przykłady okresowych raportów generowanych automatycznie przez aplikację LM Serwis PRO+®



Rys. 5. Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 100 MW – 360 MW

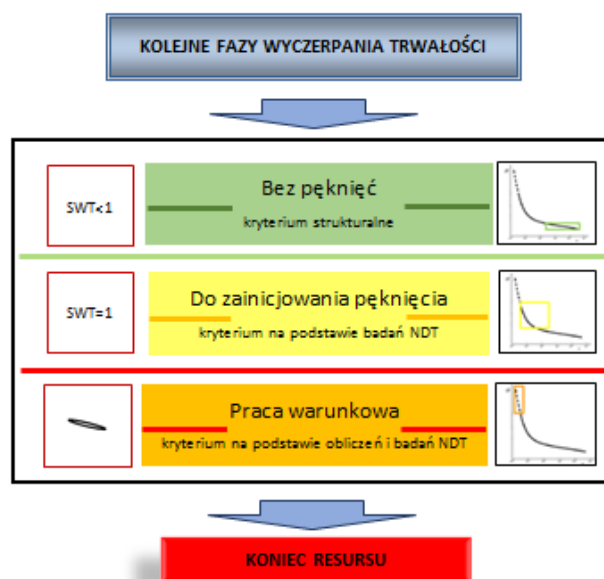


cieplno-mechanicznych elektrowni. Część standardów wykorzystywanych od dawna w polskiej energetyce, poprzedzających wydanie „Wytycznych..” opracowywana była także z udziałem specjalistów Pro Novum. „Wytyczne...” Pro Novum zostały zaimplementowane na Platformie Informatycznej LM System PRO+®, której pierwsza wersja powstała w 2004 roku. Platforma w formie programu LM Serwis PRO® została zainstalowana na kilkunastu blokach 200 MW i 360 MW oraz bloku 858 MW [2,3].

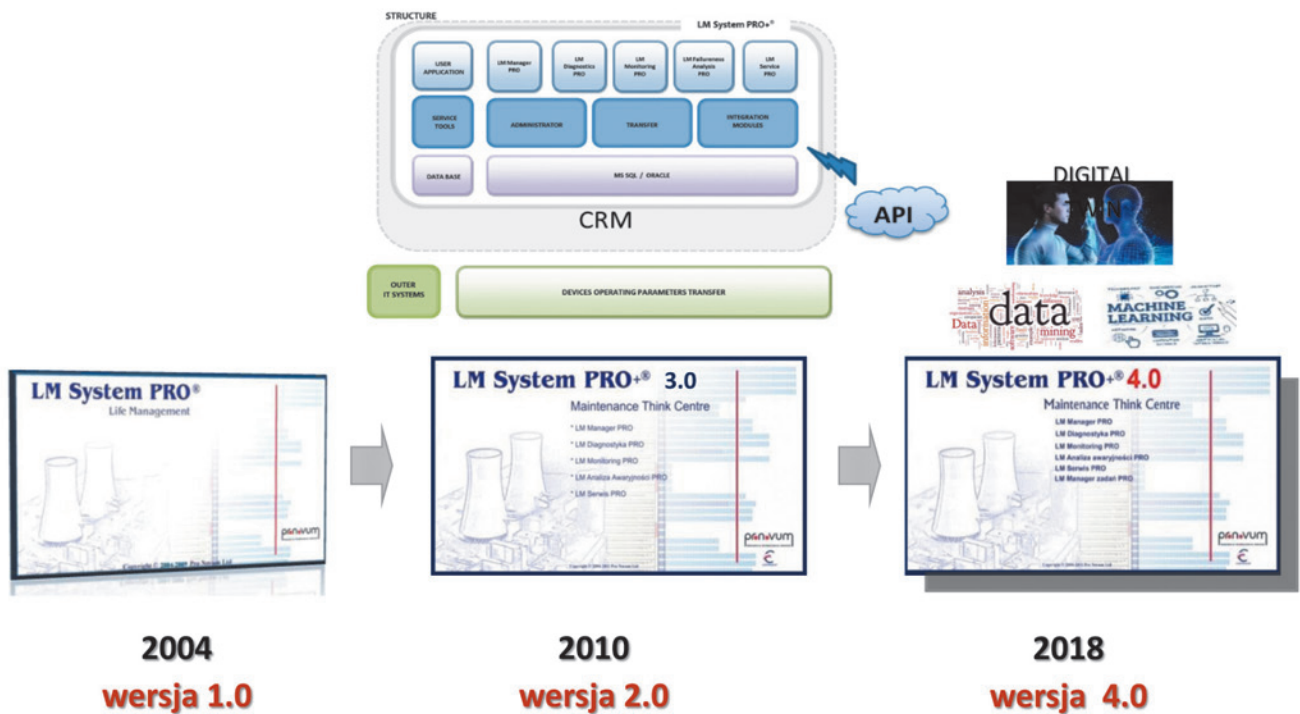


Rys. 6. Identyfikacja różnych objawów degradacji własności materiału

*/praca bez ograniczeń w okresie do następnego badania i oceny stanu technicznego



Rys. 7. Wykorzystanie zapasu trwałości elementów krytycznych bloku energetycznego



Rys. 8. Historia rozwoju Platformy Informatycznej LM System PRO+®. Źródło: opracowanie własne

Standardom badania i oceny stanu technicznego powinny towarzyszyć zasady identyfikacji degradacji własności materiału (rys. 6), jak również wyczerpania trwałości elementu (rys. 7). Często mylnie nie rozróżnia się tych zjawisk. Wyczerpanie trwałości materiału, jeśli występuje lokalnie, zwłaszcza jeśli posiada charakter zmęczeniowy nie musi oznaczać wykluczenia elementu z eksploatacji. Pęknięcia takie, jeśli zlokalizowane na powierzchni zewnętrznej elementu są na ogół łatwo naprawialne. Jeśli zlokalizowane są na powierzchni wewnętrznej elementu i nie mogą być naprawione, a element z przyczyn organizacyjnych i/lub ekonomicznych nie może być wymieniony, mogą być warunkowo eksploatowane, jeśli zastosowane metody i kryteria mechaniki pęknięcia na to pozwalają [7].

Wieloletnie serwisy diagnostyczne w zdalnym trybie

Od 2009 roku *Pro Novum* oferuje usługę serwisu diagnostycznego dla urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni w trybie zdalnym. Usługa ta realizowana jest ze wsparciem pakietu funkcjonalnego LM Serwis PRO® działającego w sposób automatyczny.

Usługa ta ma na celu nadzór nad stanem technicznym wybranych węzłów konstrukcyjnych i/lub pojedynczych elementów urządzeń elektrowni i elektrociepłowni wraz z eksperckim wsparciem i okresowo generowanymi raportami o stanie technicznym obiektów. LM Serwis PRO® pozwala na monitorowanie bieżącego stanu technicznego i prognozy trwałości oraz innych, praktycznie dowolnych problemów eksploatacyjnych i utrzymaniowych.

W ciągu jedenastu lat *Pro Novum* wdrożyło serwis diagnostyczny w różnym zakresie u różnych Klientów, z uwzględnieniem

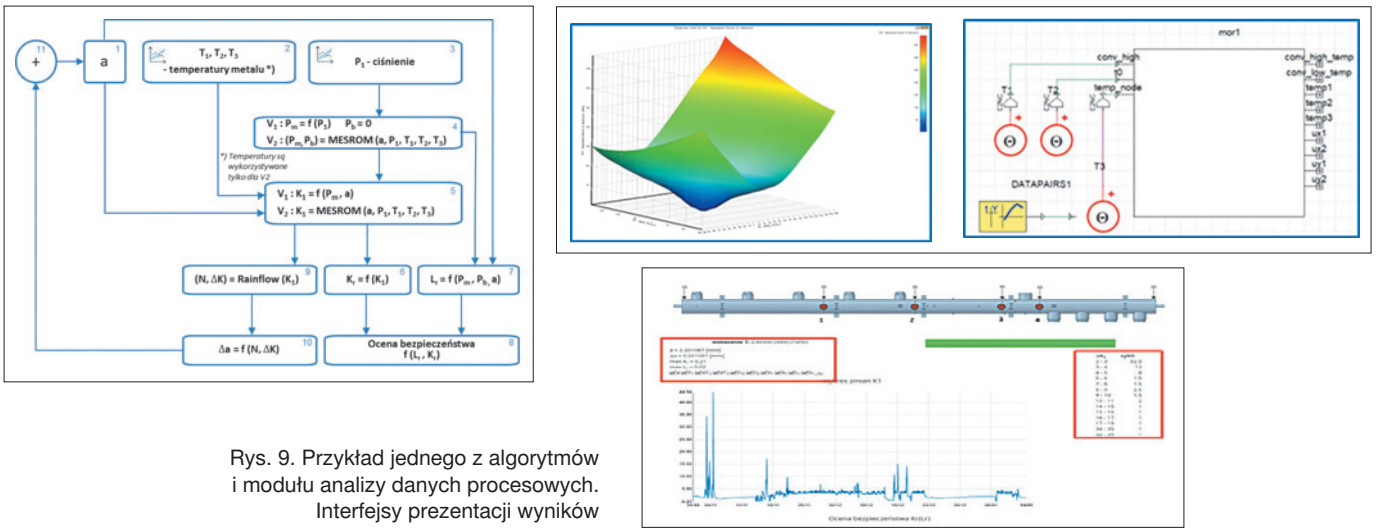
ich zróżnicowanej infrastruktury technicznej urządzeń wytwórczych. Serwis wdrażano zarówno dla urządzeń prawie nowych, zmodernizowanych jak i zakwalifikowanych do przedłużonej eksploatacji. Przy wdrażanych serwisach wykorzystuje się ponad trzydziestoletnie doświadczenia diagnostyczne *Pro Novum* oraz uwzględnia się indywidualne potrzeby Klienta.

Niektórym serwisom towarzyszy montaż specjalistycznych systemów pomiarowych (rys. 9), którym z kolei towarzyszy opracowanie procedur analitycznych i algorytmów oraz ich implementacja w odpowiednich modułach programu komputerowego. Wyniki analizy prezentowane są przy pomocy ergonomicznych interfejsów. Zwracana jest uwaga na komfort obsługi danej aplikacji jak również przystępność i przejrzystość prezentowanych wyników (rys. 10).

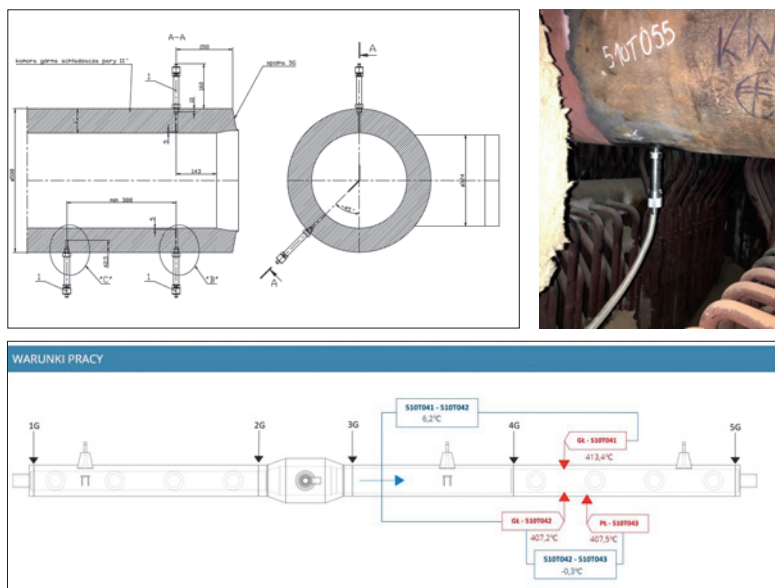
W ramach serwisów diagnostycznych możliwa jest integracja z różnorodnymi środowiskami informatycznymi. Zarówno z różnymi rodzajami systemów rejestrujących i archiwizujących dane pomiarowe, jak i z autorskimi rozwiązaniami *Pro Novum*.

Zdalna diagnostyka integrująca wiedzę i doświadczenia z eksploatacji urządzeń tej samej klasy

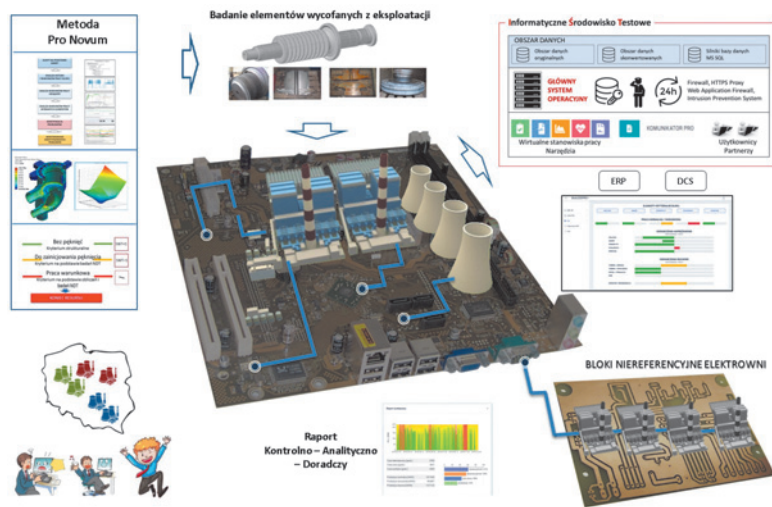
Program posiada wersję bezobsługową, automatycznie generuje raporty dla poszczególnych bloków, jak również okresowe wspólne raporty przy zachowaniu pełnej anonimowości informacji. „Wytyczne przedłużania eksploatacji...” opracowane przez *Pro Novum*, przy wsparciu specjalistów z elektrowni, uzupełniają, poszerzają i aktualizują dostępne na polskim rynku standardy badania i oceny stanu technicznego urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni.



Rys. 9. Przykład jednego z algorytmów i modułu analizy danych procesowych. Interfejsy prezentacji wyników



Rys. 10. Przykład własnego, dedykowanego systemu kontrolno-pomiarowego



Rys. 11. Najbardziej zaawansowana technicznie oraz najbardziej funkcjonalna wersja zdalnej diagnostyki, przeznaczona dla obsługi bloków tej samej klasy w skali elektrowni, grupy energetycznej oraz Krajowego Systemu Elektroenergetycznego

Najbardziej zaawansowana wiedza z diagnostyki może być źródłem strategii eksploatacji, utrzymania technicznego oraz modernizacji. Redukować nakłady na utrzymanie stanu technicznego, wykonywać niskonakładowo modernizacje, przystosowywać urządzenia do nietypowych warunków eksploatacji bez ryzyka utraty bezpieczeństwa i dyspozycyjności można tylko wtedy, gdy dysponuje się wysokiej jakości wiedzą o aktualnym stanie technicznym urządzeń.

Doświadczenia eksploatacyjne Użytkowników urządzeń jednego typu lub bardzo do siebie podobnych, to wiedza często ważniejsza niż wyniki badań. Mówią one nie tylko o problemach potencjalnych, ale zwłaszcza rzeczywistych i sposobach ich rozwiązywania.

Stan techniczny, zwłaszcza dyspozycyjność urządzeń długo eksploatowanych, pracujących w trybie regulacyjnym, w największym stopniu zależy od warunków eksploatacji oraz poziomu utrzymania technicznego. Odpowiednio wykonywana diagnostyka jest podstawowym źródłem informacji o aktualnym stanie technicznym urządzeń. Skojarzenie wyników badań wykonywanych w remontach planowych, awaryjnych oraz warunków eksploatacji to źródło informacji do planowania zakresów diagnostyki, remontów oraz nakładów na utrzymanie stanu technicznego. Największe korzyści można osiągnąć oceniając synchronicznie z warunkami eksploatacji stan techniczny dużej liczby urządzeń tej samej klasy. Maksymalny profit można osiągnąć odpowiednio integrując informacje jw. w skali np. elektrowni, grupy energetycznej czy całego KSE (rys. 11). W tym celu opracowano standardy badania, systemy zdalnej diagnostyki oraz portal internetowy integrujący informacje, wiedzę i doświadczenia. To najbardziej efektywne podejście do zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji, wysokiej dyspozycyjności oraz optymalizacji nakładów na utrzymanie stanu technicznego [4, 5].

Systemy diagnostyczne o charakterze interwencyjnym

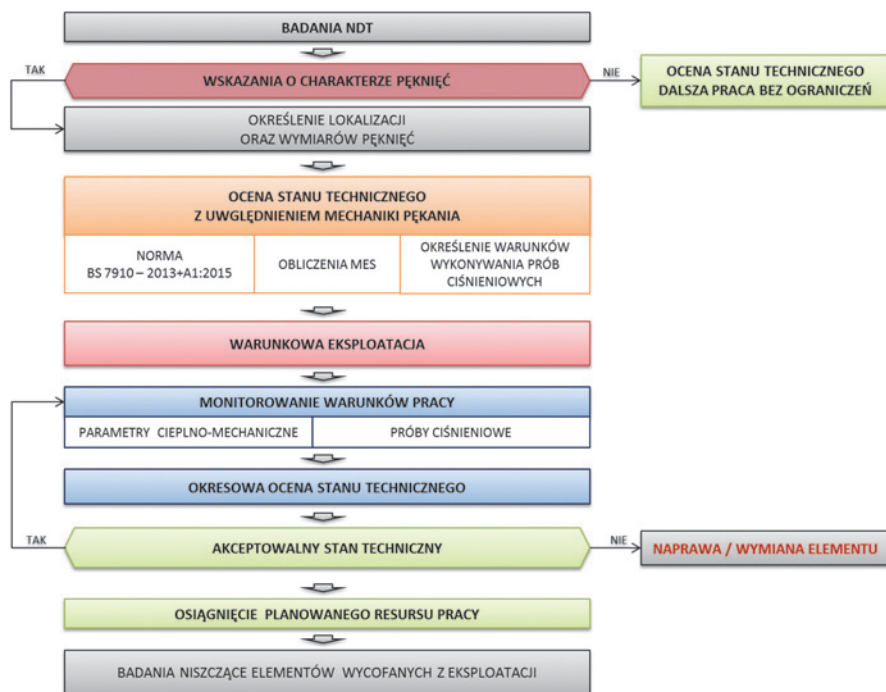
Jednym z bardziej rozpowszechnionych, w ostatnim czasie, zdalnych systemów o charakterze interwencyjnym są takie, które wspierają warunkową eksploatację uszkodzonych elementów, gdy:

- prefabrykacja i wymiana nowego elementu wymaga sporo czasu i urządzenie ze względu na uszkodzony element musiałoby zostać wyłączone z eksploatacji,
- wymiana lub naprawa uszkodzonego elementu stają się nieopłacalne z uwagi na zbliżający się koniec ich ресурсu.

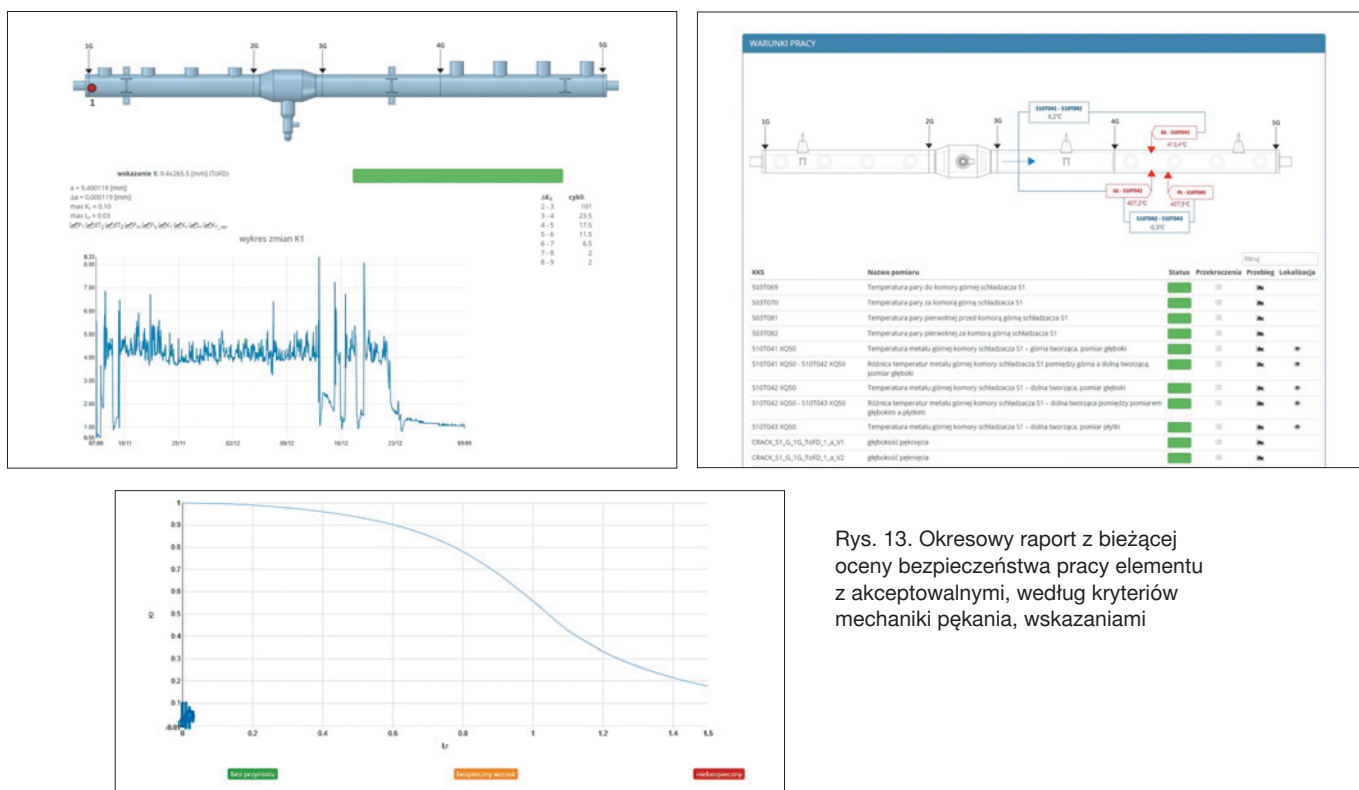
Sprawowany w tym trybie nadzór diagnostyczny to proces, który schematycznie przedstawiono na rysunku 12. Ocena stanu technicznego – możliwości i warunków dalszej pracy uszkodzonego elementu wymaga sięgnięcia po metody i kryteria mechaniki pęknięcia, najlepiej ujętych w formie normy. Zaimplementowane w formie software'u formuły obliczeniowe umożliwiają obliczeniowe śledzenie propagacji wykrytych pęknięć [6].

System na podstawie analizy warunków pracy uszkodzonego elementu na bieżąco analizuje współczynniki intensywności naprężeń w poszczególnych pęknięciach i dokonuje oceny jego bezpieczeństwa. Użytkownik urządzenia otrzymuje okresowe raporty o stanie technicznym elementu(-ów), którego przykład przedstawiono na rysunku 13.

Zwykle z ostrożności zalecamy okresowe weryfikowanie rozmiarów pęknięć jedną z metod NDT, najbardziej odpowiednią w konkretnym przypadku.



Rys. 12. Schemat procesu nadzoru diagnostycznego nad warunkową pracą uszkodzonych elementów ciśnieniowych kotła



Rys. 13. Okresowy raport z bieżącej oceny bezpieczeństwa pracy elementu z akceptowalnymi, według kryteriów mechaniki pęknięcia, wskazaniami

Barier ograniczające rozwój zdalnej diagnostyki

Korzyści wynikające ze zdalnej diagnostyki/serwisu diagnostycznego są dla *Pro Novum* oczywiste i wielostronne. Poszerzają aktualną wiedzę i obszar doświadczeń, zmniejszają ich koszty, inspirują do nowych praktycznie przydatnych rozwiązań, pomagają oferować naszym klientom nowe czy udoskonalone usługi. Zdalna diagnostyka stwarza wyjątkowe możliwości obserwacji warunków pracy urządzeń energetycznych i ich wpływu na bieżący stan techniczny elementów. Od pewnego czasu bloki pracują w innym niż przez poprzednie lata trybie. Oprócz starych, dobrze rozpoznanych problemów, ujawniają się nowe, jednak nie zawsze powiązane ze zmienionymi warunkami eksploatacji.

Trudno jednoznacznie wyjaśnić, dlaczego zdalna diagnostyka pomimo tylu rzeczywistych i potencjalnych zalet 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 opisane wcześniej 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 uproszczoną strategię utrzymania stanu technicznego majątku produkcyjnego, której humorystycznym nieco przykładem są remonty „awaryjno-planowe”, a w diagnostyce „wiara”, że większy zakres („przesiewowych”) badań przekłada się na większą wiedzę o stanie technicznym obiektu. Najtańszym sposobem oszczędzania jest korzystanie z rzetelnej wiedzy, którą można i powinno się ... zaimplementować w zdalnych systemach diagnostycznych.

Kierunki rozwoju zdalnej diagnostyki

Zdalna diagnostyka jest i pozostanie standardem na nowych blokach energetycznych, wśród których znaczącą liczbę w przyszłości mogą stanowić bloki gazowo-parowe. Z pewnością będzie na nich stanowić podstawę serwisów typu LTSA. Na długo eksploatowanych blokach konwencjonalnych, od paru lat zdobywa popularność wersja interwencyjna zdalnej diagnostyki umożliwiająca warunkową pracę elementów, których naprawa jest niemożliwa lub trudna i kosztowna, a wymiana wymaga czasu koniecznego do prefabrykacji i zabudowy nowych elementów. Użyteczną wersją takiej diagnostyki może być nadzór diagnostyczny realizowany na blokach konwencjonalnych ze zwiększoną niskonakładowo elastycznością oraz na blokach, których rewers pracy dobiega końca, tj. w okresie pomiędzy ostatnim remontem kapitalnym lub średnim a wyłączeniem bloku z eksploatacji.

Nadal niewykorzystaną szansą zdalnej diagnostyki jest strategiczne, zintegrowane zapewnienie bezpieczeństwa i dyspozycyjności bloków/urządzeń jednej klasy. Transformacja polskiej energetyki w kierunku wydzielenia zarządzania blokami węglowymi zwłaszcza tej samej klasy mogłaby być wspierana przez zintegrowaną wersję zdalnej diagnostyki tych urządzeń. Wydaje się, że to optymalna technicznie i organizacyjnie strate-

gia do zapewnienia bezpieczeństwa i dyspozycyjności nie tylko przez redukcję nakładów, ale także ochronę kompetencji, których proces redukcji trwa i będzie pogłębiał się wraz z upływem czasu. *Machine i Transfer Learning* to technologie AI, które skójarzone z organizacją utrzymania stanu technicznego typu *Field Assistance Service* (FAS) mogłyby przynieść wymierne korzyści. Wdrożenie nie wymaga długiego czasu, a korzyści mogą być długoterminowe.

Podsumowanie i wnioski

1. Zdalna diagnostyka w Polsce posiada prawie piętnastoletnią historię. Przed nią możliwa co najmniej tak długa przyszłość, zarówno na blokach nowych jak i długo eksploatowanych w końcowej fazie ich rewersu.
2. Aktualnie największą popularność zdobywa jej wersja interwencyjna zapewniająca bezpieczeństwo i dyspozycyjność uszkodzonych elementów do czasu ich prefabrykacji i wymiany bez konieczności nie tylko odstawienia bloku, ale także bez potrzeby zmiany/obniżenia jego parametrów pracy.
3. Zdalna diagnostyka, odpowiednio zorganizowana co do skali działania, wykorzystania metod AI oraz sposobu (FAS) wykonywania prac obiektowych, może wspierać bezpieczeństwo i dyspozycyjność także poprzez utrzymanie kompetencji w zakresie maintenance'u majątku produkcyjnego na odpowiednio wysokim poziomie.

PIŚMIENNICTWO

- [1] PN/045.3360/2016, Wytoczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 100-360 MW. *Pro Novum*. Katowice 2016.
- [2] 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 8.
- [3] Trzszczyński J., *Concept and Present State of Implementation of LM System PRO® – the System Supporting Supporting Maintenance of Thermo-Mechanical Power Equipment*. 3rd ETC Generation and Technology Workshop “Life Time Management of Pressurized Equipment”, Dublin 2007.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Trzszczyński 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.

Diagnostyka wirników zapewniająca bezpieczeństwo i dyspozycyjność długo eksploatowanych turbozespołów

Turbine rotors' diagnostics for safety and availability of longtime operated turbine sets

Wśród elementów krytycznych turbozespołów wirniki turbin i generatorów mają status szczególny. Skutki awarii ich wałów i elementów nasadzanych na wał oraz układów łopatkowych mogą wywołać groźne i kosztowne konsekwencje. Diagnostyka wirników powinna obejmować pełne badania nieniszczące, badania niszczące w odpowiednim zakresie oraz analizy wytrzymałościowe. W artykule opisano i udokumentowano wykonane przez *Pro Novum* badania diagnostyczne w ostatnich kilku latach w tym towarzyszące ekspertyzom poawaryjnym. Są one ważnym źródłem wiedzy na temat wpływu jakości eksploatacji oraz remontów na stan techniczny poszczególnych elementów wirników oraz możliwy horyzont czasowy ich dalszej eksploatacji. Zwrócono uwagę na szczególne znaczenie kompetencji personelu wykonującego diagnostykę, naprawy, regeneracje i montaż wirników podczas remontów turbozespołów.

Słowa kluczowe: turbozespół, wirniki turbin, generatory, diagnostyka turbin, interpretacja wyników badań

Among the critical elements of turbine sets, rotors of turbines and generators have a special status. Failure of their shafts, shaft attachments and blade systems can have serious and costly consequences. Rotor diagnostics should include full non-destructive testing, appropriate destructive testing and strength analysis. The article describes and documents the diagnostic tests performed by *Pro Novum* in the last few years, including those accompanying the post-failure expertises. They are an important source of knowledge about the impact of the quality of operation and overhauls on the technical condition of individual rotor components and the possible time horizon of their further operation. Attention was paid to the special importance of the competence of the personnel performing diagnostics, repairs, regeneration and assembly of rotors during the overhauls of turbine sets.

Keywords: turbine set, rotors of turbines, generators, diagnostics of turbine, test results, interpretation

Wśród elementów krytycznych turbozespołów wirniki turbin i generatorów mają status szczególny. Skutki awarii, zarówno ich wałów, jak również elementów nasadzanych na wał oraz układów łopatkowych, mogą wywołać groźne i kosztowne konsekwencje: remontowe, utraty produkcji i zagrożenia dla życia ludzi. Z tych powodów diagnostyka wirników powinna obejmować: pełne badania nieniszczące, badania niszczące w odpowiednim zakresie oraz analizy wytrzymałościowe, także w celu określenia wyczerpania trwałości. Stan techniczny wirników powinien być odpowiednio monitorowany, a prognoza trwałości na bieżąco weryfikowana na podstawie analizy historii i warunków pracy. *Pro Novum* – wykorzystując wiedzę z paruset badań wirników i ponad 30-letnie doświadczenia, związane zwłaszcza z ich naprawami i modernizacjami – opracowało wytyczne przedłużania ich czasu eksploatacji. Ostatnio wykonywane badania diagnostyczne, towarzyszące ekspertyzom poawaryjnym, są ważnym źródłem wiedzy dotyczącej wpływu jakości eksploatacji oraz remontów na stan techniczny poszczególnych elementów wirników oraz możliwy horyzont czasowy ich dalszej eksploatacji.

Wirnik – element krytyczny o specjalnym statusie

Za element krytyczny uważamy taki, którego awaria może:

- zagrozić bezpieczeństwu ludzi i spowodować znaczne szkody w wyposażeniu elektrowni,

- spowodować długi, nieplanowany postój i wysokie straty związane z utratą produkcji,
- pociągnąć za sobą znaczne koszty naprawy lub wymiany uszkodzonego elementu.

Wśród elementów krytycznych turbozespołów wirniki posiadają status szczególny, dlatego:

- a) podczas eksploatacji, zwłaszcza w stanach niestacjonarnych ich stan, głównie drgania i wydłużenia, powinny być odpowiednio monitorowane;
- b) podczas postojów remontowych wymagają ... odpowiednich kompetencji w zakresie diagnostyki, napraw oraz montażu.

Doświadczenia *Pro Novum* w zakresie diagnostyki wirników

Pro Novum jest firmą, która od ponad 30 lat na podstawie badań wykonuje oceny stanu technicznego ciepłno-mechanicznych urządzeń elektrowni. Wiedzę o stanie technicznym urządzeń wykorzystuje do prognozowania ich trwałości (żywołności), optymalizowania warunków eksploatacji i strategii remontowych.

Tylko w ostatnich pięciu latach *Pro Novum* wykonało:

- badania diagnostyczne 112 wirników,
- oceny stanu technicznego 98 wirników,
- ekspertyzy poawaryjne 12 wirników.

Własności mechaniczne odkuwek wirników

Lp.	Moc turbiny, MW	Własności materiałowe w temperaturze otoczenia ^{*)} Uzyskane z badań (wg producenta / wg normy)								
		Re, MPa			Rm, MPa			Twardość HB		
Wyniki badań materiału pobranego z otworu odciążającego										
1÷19	50÷200	492÷772	490	490	621÷884	620	620	207÷231	200	200
Wyniki badań materiału pobranego z wrębu										
1÷8	50÷200	521÷674	490	490	638÷720	620	620	216÷223	200	200
Lp.	Moc turbin, MW	Własności materiałowe w temperaturze 530°C Uzyskane z badań / wg producenta								
		Re, MPa			Rm, MPa					
1÷9	200	383÷394			340	410÷427			420	

^{*)} badania wykonane w latach 2014÷2019, badany gatunek stali 23H2MF

Badaniom nieniszczącym towarzyszą często badania niszczące materiału pobranego z miejsc reprezentatywnych dla odkuwki wirnika. Wyniki badań niszczących uzyskanych w ostatnich latach zestawiono w tabeli 1.

Diagnostyka wirników

Prawidłowe zaplanowanie zakresu badań diagnostycznych wirnika wymaga wykonania retrospekcji oraz uwzględnienia oczekiwań eksploatacyjnych Zmawiającego [1, 2].

Zakres badań powinien uwzględniać wszystkie istotne dla bezpiecznej eksploatacji cechy wirnika, co oznacza potrzebę przeprowadzenia:

- badań nieniszczących, w tym:
 - a) badań wizualnych i defektoskopowych (MT/PT, UT/UTPA),
 - b) badań metalograficznych (ocena stanu struktury wraz z pomiarem twardości);
- pomiarów geometrii wraz z opracowaniem wykresu biegunowego obrazującego ewentualną krzywiznę wirnika;
- badań niszczących [3] przy założeniu, że:
 - a) badania poprzedzone będą analizą wytrzymałościową MES,
 - b) pobraniu wycinka do badań nie towarzyszy potrzeba naprawy powstałego ubytku materiału.

Zakres badań wirników powinien obejmować zarówno powierzchnię zewnętrzną jak i ich otwór centralny. Opracowany na podstawie retrospekcji i kompleksowo zrealizowany zakres prac, uzupełniony o informacje remontowe (sposób postępowania z ujawnionymi w trakcie badań diagnostycznych nieprawidłowościami, zastosowane technologie napraw) powinien pozwolić na ocenę aktualnego stanu technicznego wirnika, sformułowanie prognozy trwałości oraz zaleceń remontowych i eksploatacyjnych.

Ponieważ znaczna część wirników pracujących w polskiej energetyce wkroczyła w okres trwałości indywidualnej ich dalsza praca powinna być rozpatrywana ze względu na indywidualną geometrię, własności materiału oraz warunki eksploatacji, co oznacza, że prognoza trwałości powinna być weryfikowana:

- podczas badań diagnostycznych, które w odpowiednim zakresie należy wykonywać w kolejnych remontach; zakres badań diagnostycznych powinien być adekwatny do stanu technicznego określonego w poprzednim remoncie oraz analizy historii i warunków eksploatacji w okresie poprze-

dzającym jego diagnostykę; w zależności od wyników badań należy się liczyć z możliwością korekty zakresu badań, zwykle oznacza to jego rozszerzenie;

- poprzez systematyczną analizę warunków pracy (taka analiza może być wykonywana w trybie on-line, z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania; *Pro Novum* rekomenduje odpowiednio skonfigurowany program LM Serwis PRO+[®]); wykorzystanie w tym celu typowych, jednak zweryfikowanych sygnałów ruchowych na ogół okazuje się wystarczające [5].

Dla wirników, których resurs dobiega końca, pojawienie się pęknięć nie musi oznaczać wycofania ich z eksploatacji, odpowiednio sprawowany nadzór diagnostyczny może stworzyć warunki dla dalszej warunkowej ich pracy.

Uszkodzenia wirników turbin parowych

Można wyróżnić wiele sposobów klasyfikacji uszkodzeń wirników. Dla potrzeb niniejszego artykułu, przyjęto podział na:

- uszkodzenia elementów wymiennych (łopatki, bandaże, druty łączące łopatki w pakiety, sprzęgła).
- uszkodzenia wału.

Poniżej zaprezentowano charakterystyczne przykłady uszkodzeń zidentyfikowane podczas badań własnych w ostatnich kilku latach [4, 7].

Uszkodzenia elementów wymiennych

Uszkodzenia, elementów – wymienione poniżej – choć kosztowne, są w prosty sposób naprawialne poprzez wymianę uszkodzonych elementów:

- uszkodzenia mechaniczne powstałe w stanach awaryjnych – przytarcia o elementy statyczne (tarcze kierownicze, skrzynki dyszowe) – rys. 1-2,
- uszkodzenia korozyjne (korozja naprężeniowa, postojowa) – rys. 3-4,
- uszkodzenia związane z warunkami eksploatacji (ubytki erozyjne krawędzi wlotowych i wylotowych łopatek – rys. 5-7,
- pęknięcia drutów i bandaży – rys. 8-11,
- pęknięcia łopatek – rys. 12-17,
- pęknięcia tarcz nasadzanych – rys. 18-19.



Rys. 1. Uszkodzenia bandaża i łopatek turbiny typu 25 MW



Rys. 2. Uszkodzenia stopek łopatek turbiny typu 120 MW



Rys. 3. Pęknięcie wpustu tarczy nasadzonej turbiny typu 50 MW



Rys. 4. Uszkodzenia łopatek turbiny typu 25 MW



Rys. 5. Uszkodzenia łopatek turbiny typu 125 MW



Rys. 6. Erozja ostatnich stopni wirnika NP, wirnik turbiny klasy 200 MW



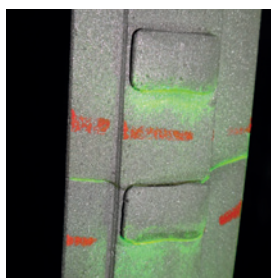
Rys. 7. Erozja ostatnich stopni wirnika NP, wirnik turbiny klasy 200 MW



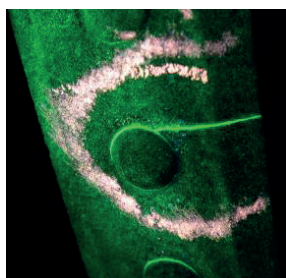
Rys. 8. Pęknięcia drutu łączącego łopatki w pakiety, wirnik turbiny 50 MW



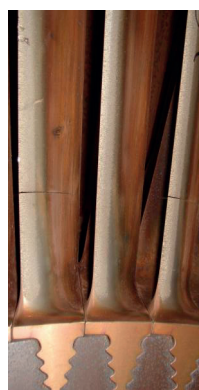
Rys. 9. Pęknięcia drutu łączącego łopatki w pakiety, wirnik turbiny 50 MW



Rys. 10. Pęknięcia bandaża, wirnik turbiny 50 MW



Rys. 11. Pęknięcia bandaża, wirnik turbiny 25 MW



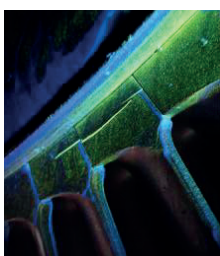
Rys. 12. Pęknięcia łopatek, wirnik turbiny 12 MW



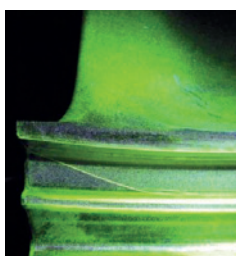
Rys. 13. Pęknięcia łopatki, wirnik turbiny 50 MW



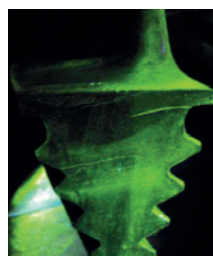
Rys. 14. Pęknięcia stopki łopatki, wirnik turbiny 75 MW



Rys. 15. Pęknięcia stopek łopatek, wirnik turbiny 75 MW



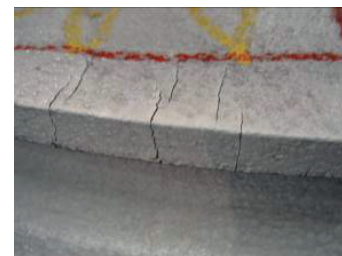
Rys. 16. Pęknięcia stopki łopatki, wirnik turbiny klasy 200 MW



Rys. 17. Pęknięcia stopki łopatki, wirnik turbiny klasy 200 MW



Rys. 18. Pęknięcia tarczy, wirnik turbiny 50 MW



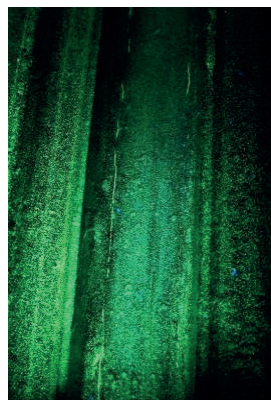
Rys. 19. Pęknięcia tarczy, wirnik turbiny 50 MW



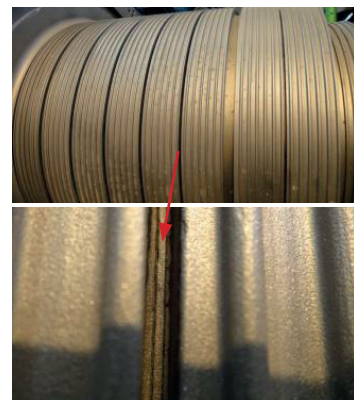
Rys. 20. Przytarcie tarczy wirnika turbiny typu 50 MW



Rys. 21. Pęknięcie wału wirnika turbiny typu 25 MW



Rys. 22. Pęknięcie wału wirnika turbiny typu 25 MW



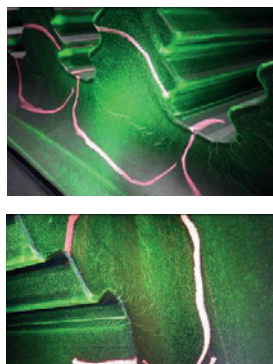
Rys. 23. Pęknięcie wału wirnika turbiny klasy 200 MW



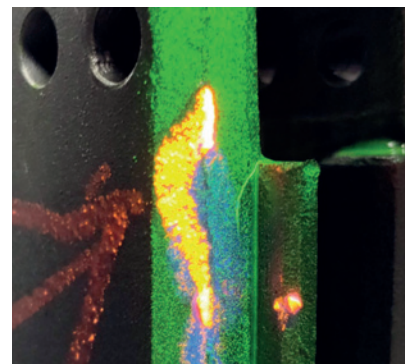
Rys. 24. Pęknięcie w narożu wrębu wału wirnika turbiny typu 120 MW



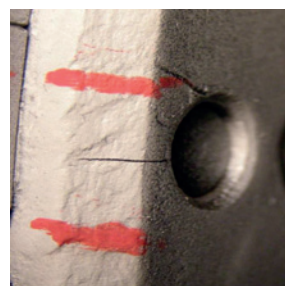
Rys. 25. Pęknięcie w narożu wrębu wału wirnika turbiny typu 120 MW



Rys. 26. Pęknięcie wrębu 3. stopnia, wału wirnika turbiny klasy 200 MW



Rys. 27. Pęknięcie wrębu w rejonie studzienki zamkowej wału wirnika turbiny typu 50 MW



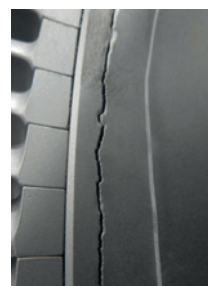
Rys. 28. Pęknięcie wrębu w rejonie studzienki zamkowej wału wirnika turbiny typu 100 MW



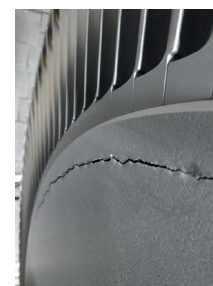
Rys. 29. Wady na powierzchni otworu centralnego wirnika generatora



Rys. 30. Wskazania na powierzchni otworu centralnego wirnika turbiny typu 25 MW



Rys. 31. Pęknięcia obwodowe na wysokości wrębu wału wirnika turbiny typu 55 MW



Rys. 32. Pęknięcia obwodowe na wysokości wrębu wału wirnika turbiny typu 35 MW

Uszkodzenia wału wirnika

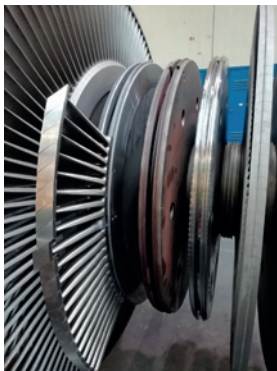
Jeszcze kilka lat temu tego typu uszkodzenia najczęściej oznaczały dyskwalifikację wirnika oraz jego wycofanie z eksploatacji. Obecnie, dzięki rozwojowi technik spawalniczych, uszkodzenia – wymienione poniżej – są również naprawiane:

- przytarcia – rys. 20,
- pęknięcia na uszczelnieniach międzystopniowych – rys. 21-22,
- pęknięcia w kanałach cieplnych dławnic – rys. 23,
- pęknięcia wrębów – rys. 24-28,
- uszkodzenia otworu centralnego wału wirnika – rys. 29-30,
- pęknięcia obwodowe (na wysokości wrębu) – rys. 31-32.

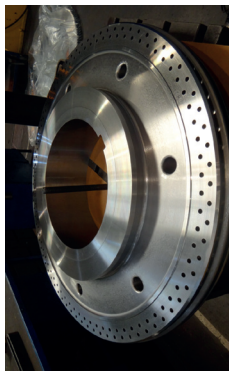
Rozwiązywanie problemów identyfikowanych podczas badań

Aby skutecznie rozwiązywać problemy wykrywane podczas badań diagnostycznych należy przeprowadzać analizy zmierzające do ustalenia przyczyny/przyczyn uszkodzeń. Powinny one m.in. obejmować:

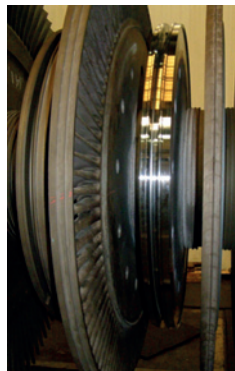
- określenie poziomu własności mechanicznych i stanu struktury,
- analizę warunków pracy,
- ocenę zakresów i technologii wcześniejszych remontów/napraw/regeneracji,
- analizy obliczeniowe MES.



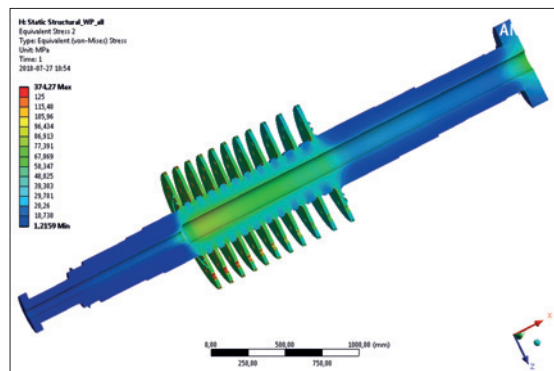
Rys. 33. Wirnik turbiny 50 MW w trakcie łopatkowania



Rys. 34. Nowa tarcza wirnika turbiny 25 MW



Rys. 35. Wał wirnika turbiny 55 MW po odtworzeniu tarczy



Rys. 36. Wirnik WP turbiny 120 MW, jeden z wariantów obliczeniowych

Po ustaleniu przyczyny, wyeliminowaniu lub zmniejszeniu jej wpływu na dalszą pracę wirnika, można wykonywać następujące naprawy:

- zabudowanie nowych łopatek – rys. 33,
- zabudowanie nowych tarcz nasadzanych – rys. 34,
- odbudowanie tarcz wirnika – rys. 35.

Preferowane jest stosowanie metod sprawdzonych w przeszłości, których skuteczność i poprawność zweryfikował czas eksploatacji oraz dodatkowo zostały potwierdzone obliczeniami MES – przykłady obliczeń rozkładu naprężeń w wale wirnika pokazano na rysunku 36.

Wykonując ocenę oraz prognozując trwałość wirnika należy pamiętać, że:

- bezpieczna, możliwie najdłuższa eksploatacja, zależy w znacznie większym stopniu od racjonalnych kryteriów oceny wyników badań i historii eksploatacji niż od zastosowanej techniki pomiarowej;
- podstawową umiejętnością przy ocenie stanu technicznego długo eksploatowanych wirników jest umiejętność interpretacji wyników badań, danych historycznych oraz posiadanie odpowiedniego doświadczenia;
- dotychczas wykonane badania własności mechanicznych wirników pokazują ich bardzo wysoki poziom, znacznie wyższy niż wymagania norm przedmiotowych lub/i wytycznej producenta.

Wnioski

1. Stan techniczny wirników turbozespołów decyduje w pierwszej kolejności o bezpieczeństwie i dyspozycyjności urządzenia.
2. Wysoki poziom diagnostyki wirników turbin powinien być zapewniony niezależnie od czasu ich eksploatacji. Trzeba pamiętać jednak, że poziom eksploatacji i jakość wcześniejszego remontu mogą mieć większy wpływ niż tryb pracy turbozespołu.
3. Wykrywane w ostatnich latach uszkodzenia wirników nie mają charakteru typowego wyczerpania trwałości, lecz:
 - dotyczą przypadków konstrukcji zaprojektowanych na określoną/niższą trwałość,
 - związane są z pogorszeniem się jakości eksploatacji,
 - wynikają z niskiej jakości wcześniejszych remontów,
 - bywają rezultatem nie zawsze dobrze przemyślanych modernizacji.

4. W okresie coraz mniej typowych warunków eksploatacji długo eksploatowanych turbozespołów rosnącą na znaczeniu formą diagnostyki powinny być profesjonalne analizy przyczyn uszkodzeń, nie tylko poawaryjnych, skojarzone z analizą warunków pracy.
5. Kompetencje firm i specjalistów zajmujących się diagnostyką turbozespołów, zwłaszcza ich wirników, mają znacznie większe znaczenie niż w przypadku oceny stanu innych elementów krytycznych bloków energetycznych. Ważną cechą kompetencji jest doświadczenie. Wiedza zdobywana, zwłaszcza w przyspieszonym tempie, często nie wystarcza.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Sprawozdanie *Pro Novum* nr PN/20.2900/2013 „Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 200 MW”. Założenia ogólne. Katowice, luty 2013.
- [2] Sprawozdanie *Pro Novum* nr PN/30.2910/2013 „Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 200 MW”. Diagnostyka elementów krytycznych turbin i generatorów. Katowice, luty 2013.
- [3] 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.
- [4] *Aktualne przykłady uszkodzeń wirników turbin parowych*. Prezentacja S. Rajca, VI Konferencja Techniczna „Utrzymanie ruchu – diagnostyka, remonty, modernizacje. Kazimierz Dolny/Kozienice, 4-5 marca 2020.
- [5] Trzeszczyński 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.
- [6] Trzeszczyński i inni: *Zdalna diagnostyka – niewykorzystana szansa na niskonakładowe zapewnienie bezpieczeństwa i dyspozycyjności urządzeń energetycznych*. „Energetyka” 2020, nr 6, Biuletyn Pro Novum 1/2020.
- [7] Sprawozdania *Pro Novum* nr 049.3096/2014, 055.3235/2015, 139.3454/2016, 042.3624/2018. Niepublikowane.