

Biuletyn

nr 1/2023

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



System zarządzania
ISO 9001:2015
ISO 14001:2015
ISO 45001:2018
www.tuv.com
ID: 900012483



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

nr LB-003/09

35 lat
pro.novum®
1987 – 2022
RESEARCH & TECHNOLOGICAL SERVICES
Centrum Badawczo - Rozwojowe

Szanowni Państwo,

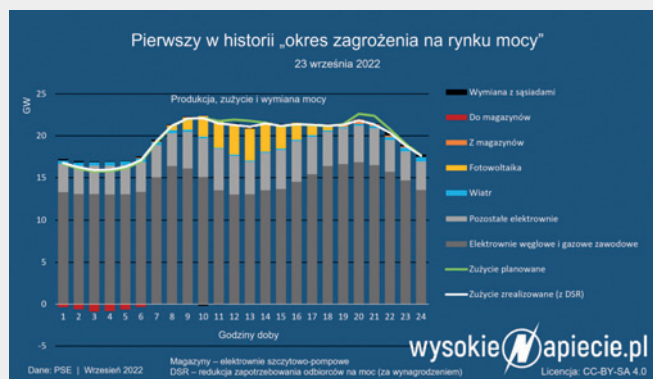
W kolejnym Biuletynie Pro Novum publikujemy artykuły, które prezentują systemowe podejście do diagnostyki. Umożliwiają zarówno ocenę aktualnego stanu technicznego, jak również weryfikowanie prognozy trwałości elementów krytycznych części ciepłno-mechanicznych bloków energetycznych w trakcie ich eksploatacji. Dotyczy to bloków energetycznych, których eksploatację planuje się nie tylko przedłużyć, ale także zwiększyć ich elastyczność zgodnie z wymaganiami Operatora; co zresztą dzieje się w coraz większym stopniu od kiedy część z nich, prawie 10 lat temu, uzyskała status JWCD.

Od dawna zwracamy uwagę, że problemu tego nie rozwiążą kolejne, nawet tzw. innowacyjne badania. Można tego dokonać tylko z pomocą Systemów Diagnostycznych zintegrowanych z procesem eksploatacji, wyposażonych w funkcje generowania, archiwizowania i udostępniania wiedzy dla potrzeb utrzymania majątku produkcyjnego elektrowni. To oczywiście nic nowego, takie systemy tworzymy i wdrażamy od prawie dwudziestu lat. Integrują one najwyższej jakości klasyczną wiedzę i doświadczenia diagnostyczne z najnowszymi technologiami analitycznymi, informatycznymi oraz modelowaniem MES, na bliźniakach cyfrowych elementów krytycznych, a nawet całych urządzeń i instalacji, kończąc. Tylko w taki sposób można wykonać wiarygodną analizę historii i warunków pracy bloków i ich poszczególnych komponentów w celu zidentyfikowania zapasów trwałości, a następnie nadzorować ich bezpieczne wykorzystanie.

Bloki węglowe weszły w ostatnią fazę eksploatacji. Zanim ona dobiegnie końca należy stworzyć nowy system elektroenergetyczny w Kraju. Aktualnie jesteśmy na początku tego trudnego, długiego i kosztownego procesu. Ten proces będzie można bezpiecznie zrealizować tylko wtedy, gdy konwencjonalne bloki, w niezbędnym zakresie, zapewnią transformacji energetycznej wsparcie. Będzie to wymagać zachowania odpowiednich kompetencji, zwłaszcza w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa i dyspozycyjności urządzeń ciepłno-mechanicznych. Mijmy nadzieję, że te, które dotąd udało się zachować, nie będą podlegały dalszej redukcji, że nie przyczynią się do wyczerpania trwałości bardziej niż nowe reżimy eksploatacji.

Jerzy Trzeszczyński

Redakcja Biuletynu Pro Novum przeprasza za błąd, jaki powstał podczas edycji tekstu do Biuletynu Pro Novum nr 3/2022. Omyłkowo na rysunku nie znalazło się źródło, z którego skorzystano. Poniżej zamieszczamy oryginalny rysunek.



Diagnostyka wspierająca bezpieczeństwo i dyspozycyjność bloków klasy 200 MW podczas kontynuowania ich eksploatacji

Diagnostics supporting the safety and availability of 200 MW class units during further operation

Kontynuowanie eksploatacji bloków klasy 200 MW nie ma aktualnie racjonalnej alternatywy. Stwarza nadzieję na pokrycie prognozowanego, ujemnego bilansu mocy w polskim systemie elektroenergetycznym po 2025 roku oraz może zapewnić bezpieczne dla KSE znaczne zwiększenie generacji ze źródeł OZE. Sprostanie temu wyzwaniu wymaga pilnego opracowania strategii eksploatacji bloków 200 MW, w tym zwłaszcza utrzymania stanu technicznego na poziomie zapewniającym bezpieczeństwo i dyspozycyjność, z uwzględnieniem coraz bardziej regulacyjnego charakteru ich eksploatacji, w perspektywie ok. 2035 roku. Przedstawiona propozycja strategii postępowania dotyczy bloków klasy 200 MW z możliwością wykorzystania niektórych jej komponentów na blokach/głównych urządzeniach ciepłno-mechanicznych, eksploatowanych przy takich samych lub podobnych parametrach pracy i wykonanych z zastosowaniem takich samych/podobnych materiałów oraz technologii.

Słowa kluczowe: przedłużanie eksploatacji, praca regulacyjna, system diagnostyczny, bloki konwencjonalne

Continuing operation of 200 MW class units currently has no rational alternative. It gives hope to cover the projected negative power balance in the Polish power system after 2025 and may ensure a significant increase in generation from RES sources, safe for the National Power System. Meeting this challenge requires an urgent development of a strategy for the operation of 200 MW units, including in particular maintaining the technical condition at a level ensuring safety and availability, taking into account the increasingly regulatory nature of their operation, in the perspective of approx. 2035. The presented strategy proposal concerns 200 MW class units with the possibility of using some of its components on units/main thermo-mechanical devices, operated with the same or similar operating parameters and made with the use of the same/similar materials and technologies.

Keywords: life extension, flexible work, diagnostics system, coal fired power units

Kontynuowanie eksploatacji bloków klasy 200 MW nie ma aktualnie racjonalnej alternatywy. Stwarza nadzieję na pokrycie prognozowanego, ujemnego bilansu mocy w polskim systemie elektroenergetycznym po 2025 roku oraz może zapewnić bezpieczne dla KSE znaczne zwiększenie generacji ze źródeł OZE. Sprostanie temu wyzwaniu wymaga pilnego opracowania strategii eksploatacji bloków 200 MW, w tym zwłaszcza utrzymania stanu technicznego na poziomie zapewniającym bezpieczeństwo i dyspozycyjność, z uwzględnieniem coraz bardziej regulacyjnego charakteru ich eksploatacji, w perspektywie ok. 2035 roku, jak również finansowania tych jednostek, po wprowadzeniu opłat ETS 550 i wygaśnięciu wsparcia z Rynku Mocy.

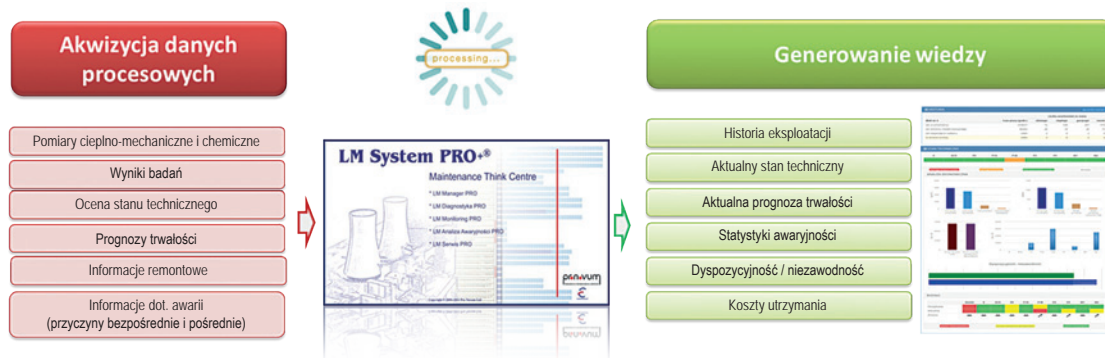
Przedstawiona propozycja strategii postępowania dotyczy bloków klasy 200 MW z możliwością wykorzystania niektórych jej komponentów na blokach/głównych urządzeniach ciepłno-mechanicznych, eksploatowanych przy takich samych lub podobnych parametrach pracy i wykonanych z zastosowaniem takich samych/podobnych materiałów oraz technologii.

Kontynuowanie, według odpowiednich zasad, eksploatacji bloków węglowych wydaje się nieuniknione w celu zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego Polski oraz akceptowalnych dla gospodarki i odbiorców indywidualnych cen energii elektrycznej i ciepła podczas transformacji polskiej elektroenergetyki w okresie do 2030/2035 roku. Może być jednym z działań dla zapewnienia zrównoważonego rozwoju kraju podczas transformacji polskiej elektroenergetyki w wymienionych latach.

Diagnostyka jako źródło wiedzy

Diagnostyka stosunkowo łatwo uporała się z wyzwaniem przedłużania eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych ponad czas „projektowy”, najpierw powyżej 100 tys. godzin, następnie powyżej 200 tys. godzin [1-5]. Zdalna diagnostyka, którą *Pro Novum* rozpoczęło wdrażać od 2004 roku na blokach o mocy od 100 MW do 360 MW (a także na blokach nadkrytycznych) zainspirowała do opracowania „Wytycznych przedłużania eksploatacji bloków klasy 200 MW do 350 tys. godzin”. Niektórzy nasze prognozy trwałości traktowali z niedowierzaniem, mimo że zostały oparte na wynikach wykonanych, w szerokim zakresie, badań niszczących elementów grubościennych z bloku, który został wyłączony z eksploatacji po przekroczeniu 250 tys. godzin pracy [6]. W międzyczasie wyłączono z eksploatacji bloki, które przepracowały ponad 310 tys. godzin. Zaprzestanie eksploatacji niektórych bloków klasy 100-200 MW, jak również ich głównych urządzeń ciepłno-mechanicznych (zwłaszcza turbozespołów), nigdy nie wiązało się z wyczerpaniem trwałości ich krytycznych/grubościennych elementów. Było rezultatem strategii rozwoju poszczególnych elektrowni.

Trwałość wielu ważnych komponentów bloków, zwłaszcza w energetyce zawodowej – od wielu lat – nie jest limitowana przez czas eksploatacji (w kolejnych latach doświadczają go coraz mniej), lecz przez ich regulacyjny tryb pracy, w rytm generacji z OZE.



Rys. 1. Zdalna diagnostyka w formie wieloletniego serwisu LM Serwis PRO+®, zapewniająca automatyczną aktualizację oceny stanu technicznego i prognozy trwałości, zrealizowana na Platformie LM System PRO+®

Dzięki wdrożeniu, prawie 20 lat temu, Platformy Informatycznej LM System PRO+® zaoferowaliśmy zdalną diagnostykę [7-17] w formie serwisów diagnostycznych LM Serwis PRO+® (rys. 1). Serwisy te w formule LTDS inspirowane były strategiami remontowymi Wydziałów Inżynierii EdF oraz Vattenfall Heat Poland. Strategie remontowe, szczególnie CBM, RCM i RBM skłaniały do możliwie ścisłego powiązania nakładów remontowych z aktualnym i dającym się przewidzieć stanem technicznym urządzeń. Podejście to w ostatnim czasie zostało w znacznym stopniu zaniechane [26]. Aprobaty nie znalazły nawet systemy automatycznego zapisu historii i warunków eksploatacji dla potrzeb diagnostyki, co jest nieodzowne zwłaszcza od kiedy bloki energetyczne eksploatowane są w trybie regulacyjnym, a zmiana pokoleniowa wśród specjalistów elektrowni sprawia, że wiedzy zgromadzonej przez nich „w głowach i biurkach” nie da się w koniecznym stopniu przekazać następcom.

Pewnym optymizmem napawa wzrost znaczenia serwisów o charakterze interwencyjnym umożliwiającym, po zaimplementowaniu algorytmów mechaniki pęknięcia, warunkową pracę uszkodzonych elementów do czasu ich wymiany lub zakończenia eksploatacji urządzenia.

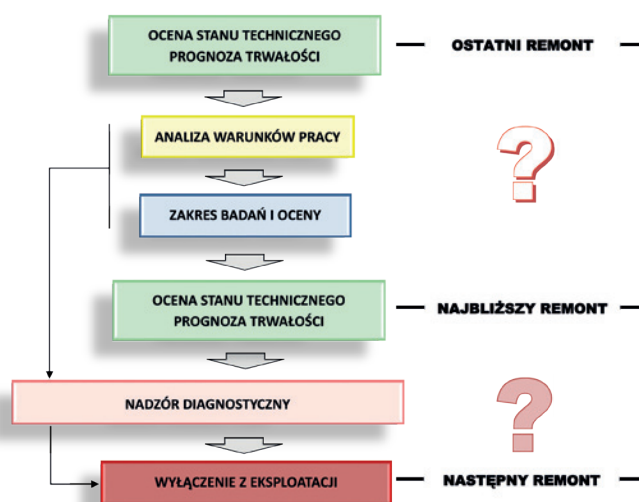
Diagnostyka wykonywana na odpowiednio wysokim poziomie może i powinna być źródłem wiedzy dla strategii eksploatacji [14-17], co ma szczególne znaczenie zwłaszcza dla urządzeń w końcowej fazie pracy. Na razie jednak nic tego nie zapowiada.

- Diagnostyka utraciła w znacznym stopniu swoją autonomię, stała się częścią remontów. Ułatwia to może organizację przetargów, ogranicza jednak korzyści użytkownika w zakresie wiedzy, zwłaszcza dotyczącej profilaktyki.
- Wymiana wiedzy i doświadczeń ulega dalszej redukcji. Trudności, jakie wywołała pandemia proces ten jeszcze bardziej akcelerują. Algorytmy realizujące *Machine & Transfer Learning* mogą w tym względzie pomóc nie tylko w skali elektrowni, ale także użytkowników jednej klasy urządzeń.
- Niska ranga działań będących źródłem najbardziej użytecznej wiedzy:
 - badań niszczących elementów/urządzeń wycofanych z eksploatacji, w śladowym zakresie korzystanie ze zdalnej diagnostyki, nawet w czasach pandemii (!),

- bardzo ograniczone korzystanie z możliwości, jakie stwarzają cyfrowe technologie w zakresie modelowania komponentów urządzeń i instalacji oraz modelowania i symulacji procesów w celu analizy warunków pracy, a zwłaszcza naprężeń, także w trybie on-line.

W perspektywie najbliższych 5-15 lat odpowiednio wykonywana diagnostyka powinna umożliwiać utrzymanie bezpieczeństwa i dyspozycyjności bloków energetycznych, urządzeń i instalacji w końcowej fazie ich eksploatacji. Wyczerpanie rzeczywistej trwałości nie powinno nastąpić tak długo, jak spełnione są wymagania prawne i ekonomiczne. Odpowiednio wykonywana diagnostyka może pomóc zastąpić tzw. strategię „awaryjno-planową” przez strategię CBM. Diagnostyka zdalna z zaimplementowanymi algorytmami cyfrowej analizy naprężeń i mechaniki pęknięcia wykonywana w trybie on-line może zapewnić tego rodzaju utrzymanie stanu technicznego urządzeń (rys. 2).

Ta klasa bloków/urządzeń/instalacji będzie dysponowała względnie niskimi budżetami utrzymaniowymi (również na diagnostykę). Im mniejsze środki na utrzymanie, tym lepiej powinny zostać wydane. Niepewność terminu i zakresu bieżącego i przyszłego remontu nie powinna być wspierana wyłącznie intuicją i doświadczeniem, zwłaszcza gdy to ostatnie może być coraz bardziej ograniczone.



Rys. 2. Diagnostyka wspierająca bezpieczeństwo i dyspozycyjność w końcowym okresie eksploatacji bloków energetycznych, urządzeń i instalacji, w warunkach ograniczonych możliwości planowania remontów, zwłaszcza o charakterze prewencyjnym

Podstawa założeń do warunków kontynuowania eksploatacji bloków 200 MW

Podstawę do opracowania założeń do kontynuowania eksploatacji bloków 200 MW stanowi wiedza oraz 35-letnie doświadczenia *Pro Novum* zdobyte podczas:

- badań diagnostycznych 42 bloków klasy 200 MW,
- monitorowania w trybie zdalnym stanu technicznego 26 bloków 200 MW,
- współpracy ze specjalistami wszystkich użytkowników bloków klasy 200 MW przy opracowaniu „Wytycznych przedłużania eksploatacji bloków jw. do 350 000 godzin”,
- rewitalizacji stalowych elementów 23 turbin klasy 13K215,
- badań niszczących krytycznych elementów kotłów (walczaki), głównych rurociągów parowych (kolan) oraz wirników, kadłubów i komór zaworowych turbin po przekroczeniu 250 000 godzin pracy,
- ponad 300-tu ekspertyz poawaryjnych.

Wiedza zdobyta w wyżej opisany sposób wskazuje, że elementy krytyczne (grubościenne) niewymienione dotąd na nowe oraz poddane rewitalizacji wykazują znaczny zapas trwałości pozwalający na ich eksploatację co najmniej do 350 tys. godzin, jeśli warunki pracy ulegną zmianie w odpowiedniej relacji do posiadanych zapasów trwałości.

Wyniki monitorowania bieżącego stanu technicznego urządzeń cieplno-mechanicznych bloków 200 MW pokazały, że:

- bloki można uruchamiać w różnym czasie, także względnie krótkim, jeśli stan techniczny urządzeń, zwłaszcza wykonawczych AKPiA, oraz kompetencje techniczne obsługi są odpowiednio wysokie;
- gradienty temperatur i poziomy naprężeń w trakcie eksploatacji można kontrolować wykorzystując oprócz Bloków Ograniczeń Termicznych (BOT) także kryteria naprężeniowe, zaimplementowane w Blokach Kontroli Trwałości (BOT);
- uszkodzenia zarówno o charakterze pełzaniowym jak i zmęczeniowym oraz zmęczeniowo-pełzaniowym są w większym stopniu skutkiem błędów konstrukcyjnych, montażowych oraz niesprawności urządzeń automatyki (np. praca schładzaczy) niż warunków pracy, nawet intensywnie regulacyjnej (dotyczy to nie tylko bloków 200 MW).

Bloki 200 MW nie zasługują na często używane o nich określenie jako bloki „stare”. Stare są ich numery stacyjne. Prawie wszystkie były wielokrotnie modernizowane, a ich elementy krytyczne/grubościenne zostały w wielu przypadkach wymienione na nowe lub zrewitalizowane (uzyskały trwałość elementów nowych).

Ważnym atutem bloków skonstruowanych w Polsce i zbudowanych przez polskich dostawców jest względnie łatwa naprawa uszkodzeń technologiczno-eksploatacyjnym o zmęczeniowym, termomechanicznym charakterze.

Badania i testy przeprowadzone na blokach klasy 200 MW wykazały, że po przepracowaniu ok. 250 000 godzin elementy krytyczne kotła, turbiny i rurociągów parowych posiadają wystarczający zapas trwałości, aby nadal pracować bezpiecznie, także w warunkach pracy intensywnie regulacyjnej, którą można osiągnąć odwołując się do rezerw w systemach sterowania.

Sprawność tych bloków jest niższa niż nowych bloków węglowych. Trzeba pamiętać jednak o tym, że będą w coraz większym stopniu pełnić funkcję regulacyjną, gdzie priorytetem będzie ich elastyczność oraz dyspozycyjność. Regulacyjnie pracujący blok na parametry nadkrytyczne może mieć sprawność porównywalną ze zmodernizowanym blokiem klasy 200 MW.

Bloki klasy 200 MW pracują nadal w wielu krajach: w Serbii, Bośni i Hercegowinie, w Turcji, Indiach oraz w Ukrainie i Federacji Rosyjskiej. Część z nich, np. w Indiach, zostało uelastycznionych. Czas eksploatacji niektórych z nich, np. w Bośni i Hercegowinie, będzie przedłużany o ok. 20 lat.

Transformacja polskiej elektroenergetyki – ocena aktualnej sytuacji i próba prognozy

Transformacja polskiej energetyki trwa odkąd ona istnieje. Jej tempo mogłoby być większe. Jednak specyficzne jej problemy połączone z polityką klimatyczną Unii Europejskiej sprawiły, że znalazła się w bardzo trudnym położeniu. Po 2025 roku bloki 200 MW mogą utracić nie tylko wsparcie na Rynku Mocy, ale także od strony kompetencji technicznych. Te ostatnie wyczerpują się znacznie szybciej niż wyczerpaniu ulega trwałość urządzeń.

Wydaje się, że zaradzić temu można tylko w jeden sposób. Zachować w eksploatacji – na jakiś czas – bloki 200 MW. Stworzyć warunki do kontynuowania ich eksploatacji. Zadanie nie jest łatwe, bo jak każde działanie w energetyce wymaga odpowiednich decyzji na poziomie politycznym, organizacyjnym oraz technicznym.

Należy powiązać, w odpowiedni sposób, czas i warunki dalszej eksploatacji bloków klasy 200 MW z rzeczywistym tempem wdrażania OZE oraz z weryfikacją korzyści z tym związanych. Bloki 200 MW należy, w zależności od potrzeb, przesuwac do rezerwy, a nie likwidować. Dziś, przy obecnych zapisach taksonomii, nie ma możliwości sfinansowania ani modernizacji, ani tym bardziej budowy nowych bloków węglowych.

Nowe bloki węglowe nie będą już budowane. Aktualnie eksploatowane powinny pracować tak długo, aż zdobędziemy pewność, że zapewnimy sobie bezpieczeństwo energetyczne bez potrzeby importu energii. Zwolennicy energetyki odnawialnej powinni, w największym stopniu, być zainteresowani takim scenariuszem. Związane z tym koszty należy traktować jako koszty transformacji. Bezpieczeństwo energetyczne Państwa nie ma swojej ceny.

Zarys założeń do kontynuowania eksploatacji

Kontynuowanie eksploatacji bloków 200 MW przez najbliższe 10-15 lat należy traktować jako ostatni etap ich eksploatacji. Ten czas powinien zostać dobrze wykorzystany dla stworzenia najbardziej korzystnego dla Polski nowego modelu sektora elektroenergetycznego. W tym celu należy:

- dalszą eksploatację bloków węglowych powiązać ściśle z tempem wdrażania OZE;
- dokonać oceny stanu technicznego bloków węglowych, zwłaszcza klasy 200 MW, czy będą mogły, jeśli znajdzie taka potrzeba i ich stan techniczny na to pozwoli, być eksploatowane po 2025 roku;

- utrzymywać stan techniczny (remonty i diagnostyka) na poziomie technicznym zapewniającym ich bezpieczną eksploatację oraz oczekiwaną dyspozycyjność;
- wszystkie bloki przystosować do przedłużenia eksploatacji, a niektórym zapewnić:
 - poprawę elastyczności, zwłaszcza w zakresie:
 - obniżenia minimum technicznego,
 - poszerzenia pasma zmienności mocy,
 - (ewentualnie inne funkcjonalności zgodnie z potrzebami PSE),
 - obniżenie emisji CO₂ do technicznie i ekonomicznie uzasadnionych poziomów;
- zweryfikować i zaktualizować obowiązujące aktualnie „Wytyczne ...” odnoszące się do przedłużania eksploatacji urządzeń ciśnieniowych, turbozespołów oraz urządzeń pomocniczych, opracować kolejne według potrzeb;
- wdrożyć systemy diagnostyczne, adekwatne do trybu pracy bloków, które od wielu lat eksploatowane są regulacyjnie (z rosnącą intensywnością);
- monitorować bieżący stan techniczny w trybie zdalnej diagnostyki wykorzystując, skalibrowane na podstawie historii eksploatacji, bliźniaki cyfrowe elementów krytycznych kotłów i turbozespołów oraz bliźniaki cyfrowe kompletnych instalacji rurociągowych;
- przywrócić system wymiany informacji i wiedzy pomiędzy użytkownikami bloków klasy 200 MW w ramach grup energetycznych, najlepiej w ramach KSE (NABE?);
- diagnostyce zapewnić autonomię, powinna być źródłem wiedzy korporacyjnej, a nie tylko częścią remontu;
- oprócz wymiany elementów o wyczerpanej trwałości stosować sprawdzone technologie rewitalizacji oraz regeneracji;
- przywrócić klasyczne remonty kapitalne o charakterze zapobiegawczym;
- stan techniczny bloków utrzymywać w formule LTSA (*Long Time Service Agreement*) oraz LTDSA (*Long Time Diagnostic Service Agreement*), co zapewni wymagany poziom utrzymania technicznego, zwłaszcza poprzez zapewnienie koniecznego poziomu kompetencji technicznych personelu firm remontowych i diagnostycznych;
- prowadzić profesjonalną analizę awaryjności.

Wiedza i ponad 35-letnie doświadczenia *Pro Novum* oraz innych Firm i Instytucji w zakresie bloków klasy 200 MW mogą zostać wykorzystane dla szybkiego rozpoczęcia prac oraz wyboru najkorzystniejszych rozwiązań. Do Projektu [18] powinni dołączyć specjaliści utrzymania majątku o odpowiedniej wiedzy i odpowiednim doświadczeniu. Należy rozważyć udział także tych specjalistów, często o najwyższych kwalifikacjach, którzy już nie są czynni zawodowo.

Transformacji w zakresie metod wytwarzania energii i jej dystrybucji towarzyszyć będzie ewolucja diagnostyki. Ważniejsze znaczenie niż nowe techniki badania i pomiarów będzie miało nowe podejście do przetwarzania informacji – nie tylko wyników badań – w wiedzę. Zaawansowane technologie analityczne i metody AI sprawią, że wiedzę będą zdobywać w większym stopniu algorytmy niż ludzie. W większym niż dotąd stopniu będzie źródłem strategii eksploatacji i utrzymania technicznego.

- [1] Trzeszczyński J., *System diagnostyczny zapewniający bezpieczną pracę bloków 200 MW po przekroczeniu 300 tys. godz. Eksploatacji*, „Dozór Techniczny” 2012, nr 2.
- [2] 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.
- [3] Brunné W., *Zamocowania rurociągów wysokoprężnych i wysokotemperaturowych po długotrwałej eksploatacji*, „Dozór Techniczny” 2007.
- [4] Grzesiczek E., Trzeszczyński J., Rajca S., *Możliwości wydłużania czasu eksploatacji elementów części przepływowych turbin parowych*, „Energetyka” 2003, nr 12.
- [5] Trzeszczyński J., *Eksploatacja urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrycznych po przekroczeniu trwałości projektowej – Rekomendacje i doświadczenia Pro Novum*, „Nowa Energia” 2014, nr 1.
- [6] 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.
- [7] Trzeszczyński J., *Remote Diagnostic Systems for Assessment of Thermo-Mechanical Equipment of Power Plants*. Proceedings of 2nd ECCC Creep Conference, 21-23 April 2009, Zurich.
- [8] Trzeszczyński 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.
- [9] Trzeszczyński 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.
- [10] Trzeszczyński 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.
- [11] Trzeszczyński J., Murzynowski W., Stanek R., Mordalski W., *Zdalna diagnostyka – niewykorzystana szansa na niskonakładowe zapewnienie bezpieczeństwa*, „Energetyka” 2020, nr 6, Biuletyn Pro Novum 1/2020.
- [12] Stanek R., Trzeszczyński J., Dąbrowski M., *Diagnostyka jednego typu urządzeń w skali KSE z wykorzystaniem portalu internetowego integrującego informacje eksploatacyjne*, „Energetyka” 12/2017, nr 12, Biuletyn Pro Novum 2/2017.
- [13] *Flexibility Toolbox. Compilation of Measures for the Flexible Operation of Coal-Fired Power Plants*. VGB PowerTech. VGB-B-033.
- [14] Trzeszczyński J., Trzeszczyńska 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.
- [15] Trzeszczyński J., Trzeszczyńska E., *Diagnostic as a source of knowledge and strategy for units of coal flexible fired power plants*. VGB PowerTech 9/2020.
- [16] Trzeszczyński J., *Bloki klasy 200 MW dziś i jutro*, „Energetyka” 2020, nr 6, Biuletyn Pro Novum 1/2020.
- [17] Trzeszczyński J., *Diagnostyka źródłem wiedzy i strategii eksploatacji*, „Energetyka” 2020, nr 12, Biuletyn Pro Novum 2/2020.
- [18] Trzeszczyński J., Hattas M., Murzynowski W., Stanek R., *Using the Remote Diagnostic Systems based on Virtual Testing Environment and Digital Twins to Lifetime Assessment of Power Equipment*. VGBE Materials and Quality Assurance 2023. Schloss Paffendorf. 10-11 May 2023.
- [19] *Projekt BLOKI 2025+ Zakończenia do strategii kontynuowania eksploatacji bloków klasy 200 MW*. W trakcie opracowania oraz konsultacji.

Określanie i monitorowanie zapasów trwałości elementów krytycznych na potrzeby przedłużonej eksploatacji bloków energetycznych w nowych reżimach pracy

Determining and monitoring reserve durability critical components of power units for life extension in new operation regims

Trwałość znacznej części elementów krytycznych urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków energetycznych od wielu lat nie jest limitowana przez czas eksploatacji, lecz przez intensywność regulacyjnego trybu pracy oraz jakość eksploatacji i remontów. Wykorzystując dostępne metody badań i systemy diagnostyczne oraz metody obliczeniowe, w tym oparte na modelowaniu MES i kryteriach mechaniki pęknięcia można z wystarczającą dla praktyki dokładnością określać zapasy trwałości elementów krytycznych, także wtedy gdy ich praca może odbywać się w trybie warunkowym.

Słowa kluczowe: przedłużanie eksploatacji, zapas trwałości, praca regulacyjna, system diagnostyczny

Durability of a significant part of critical elements of thermo-mechanical equipments of power units for many years is not limited by the time of operation, but by the intensity of the regulatory mode of operation and the quality of operation and repairs. Using the available test methods and diagnostic systems as well as computational methods, including those based on FEM modeling and fracture mechanics criteria, it is possible to determine the reserve durability of critical elements with sufficient accuracy for practice, also when their operation in conditional mode.

Keywords: life extension, reserve of durability, flexible work, diagnostics system

Kontynuowanie eksploatacji bloków węglowych w okresie transformacji polskiej energetyki nie posiada racjonalnej alternatywy. To warunek zwiększania generacji z OZE w sposób niezakłócający stabilności systemu elektroenergetycznego. Aby tego dokonać należy przedłużyć eksploatację wskazanych przez Operatora/NABE bloków energetycznych, w tym zwłaszcza klasy 200 MW, jednocześnie przystosowując je do pracy jeszcze bardziej niż dotąd regulacyjnej. Działanie to rozpocząć należy od określenia ich aktualnego stanu technicznego, w tym zapasów trwałości elementów krytycznych. Trwałość wielu elementów krytycznych urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków energetycznych od wielu lat nie jest limitowana przez czas eksploatacji, lecz przez intensywność regulacyjnego trybu pracy oraz jakość eksploatacji i remontów. Wykorzystując dostępne metody badań i systemy diagnostyczne oraz metody obliczeniowe, w tym oparte na modelowaniu MES i kryteriach mechaniki pęknięcia, można z wystarczającą dla praktyki dokładnością określać zapasy trwałości elementów krytycznych, także wtedy, gdy ich praca może odbywać się w trybie warunkowym.

Uwagi wstępne

Wszystkie komponenty bloków i urządzeń energetycznych, zarówno krytyczne jak i pozostałe wpływające na niezawodność, ulegają wyczerpaniu trwałości podczas eksploatacji. Dzieje się to z wielu przyczyn, które z kolei mogą występować z różnym nasileniem i interakcją. Sprawia to, że elementy mogą pracować zarówno skrajnie krótko jak i ekstremalnie długo. Bardzo często zdarza

się, że elementy, zwłaszcza krytyczne, mogłyby pracować dłużej niż urządzenie, które wyłącza się z eksploatacji z przyczyn ekonomicznych lub prawnych. Skrajnie krótki czas eksploatacji dotyczy elementów z wadami konstrukcyjnymi, materiałowymi i/lub montażowymi (rys. 1). Wyczerpanie trwałości ma najczęściej charakter lokalny, może być więc naprawione bez konieczności wymiany elementu czy wyłączenia urządzenia z eksploatacji.

Objawami wyczerpania trwałości mogą być m. in.:

- zmiana własności materiału na skutek długotrwałej pracy przy temperaturach zbliżonych do dopuszczalnej temperatury pracy dla danego gatunku materiału,
- fizyczne uszkodzenia struktury wywołane pracą w warunkach pełzania,
- nadmierne deformacje wywołane długotrwałą pracą w warunkach pełzania,
- pęknięcia zmęczeniowe lub/i termozmęczeniowe,
- pęknięcia termosokowe,
- pęknięcia wywołane korozją naprężeniową,
- redukcja grubości ścianki/profilu wywołana erozją oraz przez różne rodzaje korozji, w tym FAC.

Do wyczerpania zapasu trwałości dochodzi na ogół wtedy, gdy eksploatacji towarzyszy więcej niż jedna przyczyna jej utraty. Przyspieszają ją nieprawidłowości o charakterze eksploatacyjnym oraz technologicznym, montażowym i/lub remontowym (rys. 1). Zdarza się, że uszkodzenia pojawiają się na skutek nieoptymalnych rozwiązań i błędów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Te przyczyny uszkodzeń noszą nazwę pośrednich. W wielu przypadkach to właśnie one decydują czy teoretycznie wyznaczona

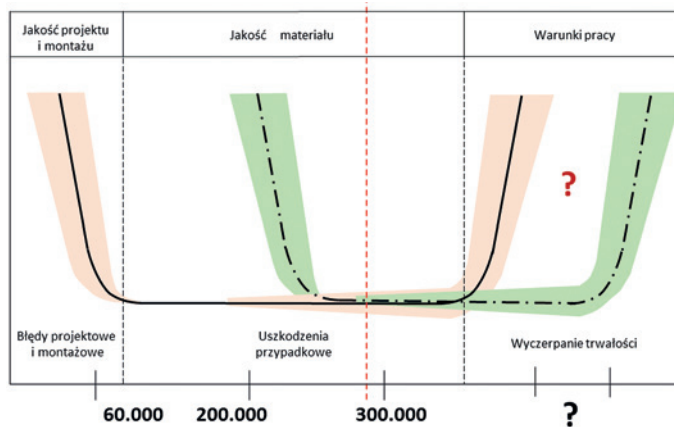
prognoza zostanie dotrzymana oraz czy naprawa okaże się skuteczna. Identyfikacja przyczyn pośrednich uszkodzeń oraz ich wyeliminowanie, a przynajmniej ograniczenie, ma zasadnicze znaczenie praktyczne oraz odróżnia stopień wyczerpania trwałości (SWT) liczony według teoretycznych wzorów od zapasów trwałości w rozumieniu takim, w jakim to pojęcie używane jest w niniejszym artykule. Z zagadnieniem zapasów trwałości wiąże się także weryfikacja potencjalnych stref uszkodzeń (PSU) oraz identyfikacja rzeczywistych stref uszkodzeń (RSU), które nie wynikają tylko z geometrii i dokumentacyjnych cech konstrukcji, ale także z nieprawidłowości o charakterze pośrednich przyczyn uszkodzeń, będących głównym źródłem awarii.

Pęknięcia będące najczęstszymi objawami wyczerpania trwałości mogą mieć charakter eksploatacyjny lub technologiczny, a także technologiczno-eksploatacyjny.

Inicjacji i rozwojowi pęknięć sprzyjają: stan naprężeń/odkształceń, własności materiału oraz temperatura elementu. Np. płaski stan odkształcenia w obecności pęknięć o rozmiarach krytycznych dla materiału o wysoko położonej temperaturze przejścia w stan kruchy może spowodować całkowite zniszczenie walczaka podczas próby ciśnieniowej.

Obecność pęknięć nie musi jednak oznaczać całkowitego wyczerpania trwałości/funkcji użytkowych elementu. Wykorzystując metody i kryteria mechaniki pęknięcia można przeprowadzić zarówno analizę bezpieczeństwa każdego takiego przypadku, jak również określić warunki bezpiecznej eksploatacji w okresie do naprawy elementu lub jego wymiany (rys. 1) [13-15].

Urządzenia energetyczne projektowano, teoretycznie, na określoną trwałość. Jednak na ogół nie uwzględniano skutków zmęczenia. Przewymiarowanie wynikające z wykorzystania współczynników bezpieczeństwa chroniło skutecznie przed wyczerpaniem trwałości, gdy warunki pracy były zgodne z wymaganiami zawartymi w instrukcjach eksploatacji. Urządzenia energetyczne bloków węglowych oddawane do eksploatacji do ok. 1980 roku projektowano praktycznie na czas nieograniczony. Elementy krytyczne, np. wirniki turbin i generatorów bloków 200 MW, pracują ok. 300 tys. godzin bez objawów wyczerpania trwałości. Nieliczne uszkodzenia o charakterze zmęczeniowym są łatwo usuwalne, bez potrzeby naprawy przez spawanie.

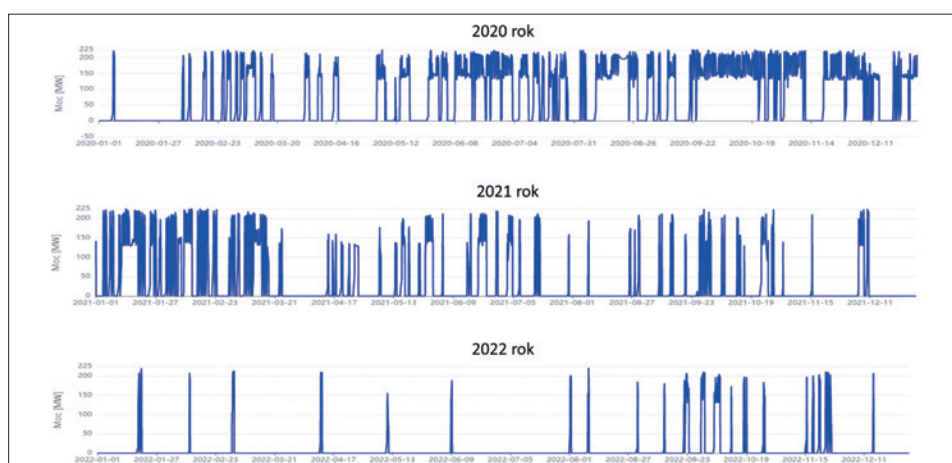


Rys. 1. Awaryjność urządzeń bloku energetycznego w poszczególnych okresach eksploatacji z uwzględnieniem skutków modernizacji, tj. wtedy, gdy w ostatnim okresie eksploatacji bloku mogą występować uszkodzenia typowe zarówno dla elementów długo eksploatowanych jak i nowych

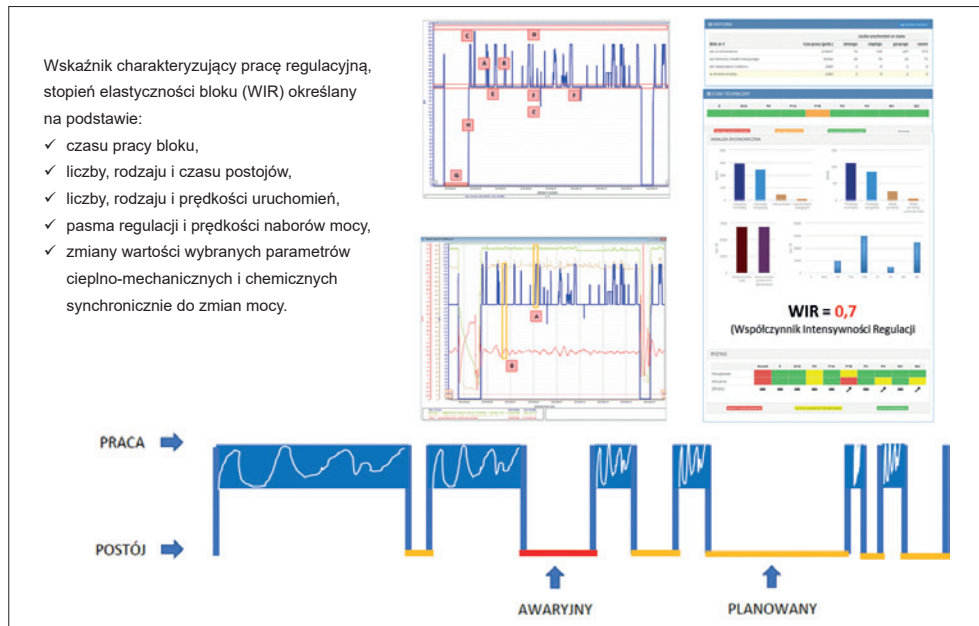
Nie dotyczy to jednak bloków nowych lub zmodernizowanych części bloków długo eksploatowanych. Projektuje się je na ogół na ok. 200 tys. godzin pracy. W wielu przypadkach bez możliwości naprawy, często także z utrudnionymi badaniami diagnostycznymi. Naprawę „zastępuje” wymiana elementu lub całego węzła konstrukcyjnego. Tryb LTSA przez pierwsze ok. 10 lat eksploatacji praktycznie skazuje użytkownika na strategię techniczną (i biznesową) dostawcy urządzenia.

Regulacyjny charakter pracy bloków wyzwaniem dla diagnostyki

Charakter pracy bloków energetycznych, nie tylko o statusie JWCD, zmienia się od kilkunastu lat. Status JWCD uzyskało część bloków 10 lat temu. W świadomości osób zajmujących się diagnostyką ten fakt nie zyskał jednak powszechnego zrozumienia. Nadal jako oczekiwane kryterium prognozowania stosuje się liczbę godzin, co trudno uznać za adekwatne dla takiego trybu pracy, jaki przykładowo przedstawiono na rysunku 2. Wykonywana obecnie diagnostyka praktycznie nie uwzględnia negatywnych skutków postojów. Nie wiąże regulacyjnego trybu pracy z negatywnymi skutkami dla stanu technicznego niektórych elementów i węzłów konstrukcyjnych bloków.



Rys. 2. Przykład zmiany trybu pracy jednego z bloków klasy 200 MW na przestrzeni ostatnich paru lat



Rys. 3. Przykład monitorowania warunków pracy bloku w celu wyznaczenia wskaźnika intensywności pracy regulacyjnej WIR

Eksploatacji bloku w trybie regulacyjnym, a zwłaszcza bloku o zwiększonej elastyczności, powinna towarzyszyć w trybie on-line analiza wartości wskaźnika WIR (wskaźnik intensywności regulacji, nieco zmodyfikowany odpowiednik wskaźnika IFO (*index of flexible operation* – IFO) – rysunek 3. Może on spełniać dwie istotne funkcje:

- stanowiąc kryterium stosowalności klasycznej diagnostyki dla bloków eksploatowanych z rosnącą intensywnością regulacji (w miarę wzrostu w KSE generacji z OZE),
- oceniając efektywność eksploatacji bloków z powiększoną elastycznością, jeśli wskaźnik WIR w odpowiedni sposób skojarzyć z wartością sprzedanej energii oraz kosztami maintenance'u.

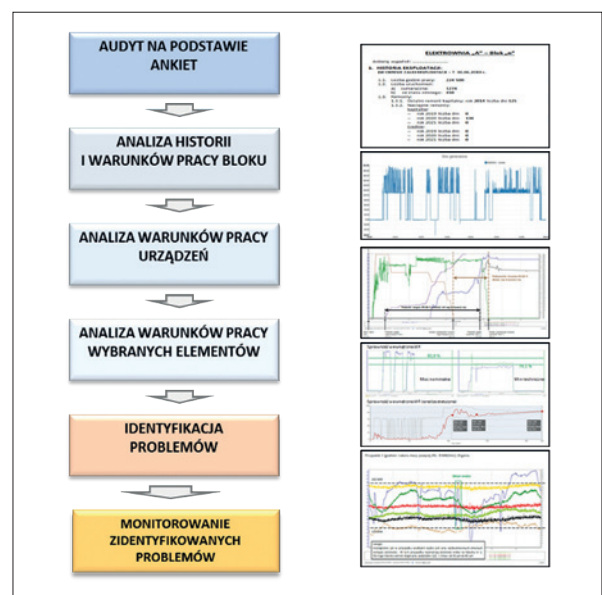
To ważna wiedza zarówno dla producenta energii jak i Operatora KSE.

Retrospekcja – analiza historii i warunków eksploatacji

Retrospekcja to nieodzowna czynność poprzedzająca każdy rodzaj diagnostyki, zwłaszcza gdy dotyczy ona oceny stanu technicznego bloku energetycznego oraz prognozy trwałości większości jego komponentów. Z praktyki wiadomo, że klasyczna retrospekcja natrafia na spore braki w zakresie dokumentacji oraz danych odnoszących się do czasu pracy i liczby uruchomień z typowych stanów ciepłych dla poszczególnych komponentów bloku. Często takie dane odpowiedniej jakości odnoszą się tylko do okresu pomiędzy ostatnimi remontami bloku. To rezultat rezygnacji elektrowni z systemów klasy *life management* opracowanych przez *Pro Novum* i zainstalowanych ok. 20 lat temu na większości bloków klasy 200 MW i 360 MW, a także o mniejszej mocy [3, 5, 12]. Po ich likwidacji nie zainstalowano dotąd żadnych odpowiedników. Zmiany pokoleniowe w elektrowniach pogłę-

biły jeszcze ten problem. Ten sam los spotkał system do integracji wiedzy o stanie technicznym (awaryjności) tej samej klasy urządzeń (bloków 200 MW) [16]. Można mieć nadzieję, że tego rodzaju podejście do bezpieczeństwa urządzeń energetycznych w ostatniej fazie ich eksploatacji ma szansę na wykorzystanie przez NABE.

Jeśli blok pracuje regulacyjnie, a zwłaszcza gdy oczekuje się zwiększenia jego elastyczności, to retrospekcję należy wykonywać w trybie audytu bloku, co zilustrowano na rysunku 4. Umożliwia ona identyfikację elementów wrażliwych na pracę w zmienionym reżimie pracy oraz ocenę jej skutków.



Rys. 4. Retrospekcja w trybie audytu pracy bloku/urządzenia energetycznego w możliwie najdłuższym okresie poprzedzającym ocenę jego aktualnego stanu technicznego, z wykorzystaniem analizy wybranych danych procesowych w trybie off-line

Zakres i metody badań

Poprawny zakres badań może powstać wyłącznie na podstawie prawidłowo przeprowadzonej retrospekcji. Obecnie nie zawsze ma to miejsce. Po wizji lokalnej obiektu przygotowanego do badań dostrzeżone braki trudno skorygować. Dotyczy to także ewentualnego rozszerzenia badań na podstawie negatywnych wyników. Zakres niektórych badań wydaje się przewymiarowany, np. badań metalograficznych [1, 2]. Prawidłowy zakres badań ma duże znaczenie dla ich kosztów, zwłaszcza czynności odnoszących się do przygotowania do badań (rusztowania, prace izolacyjne, przygotowania powierzchni, etc).

Oceniając stan techniczny bloków/urządzeń/elementów krytycznych najlepiej korzystać z metod o sprawdzonej przydatności. Względnie nowe, ultradźwiękowe techniki badań, jak np. Phased Array czy ToFD poszerzyły możliwości badań ultradźwiękowych. Technika prądów wirowych znalazła szerokie zastosowanie w badaniach wkładów rurowych wymienników ciepła oraz otworów centralnych wirników, a mikroskopia scanningowa SEM wraz z przystawkami EDS do mikroanalizy składników struktury materiałów istotnie powiększyły możliwości badań metalograficznych. Wiele nowych badań wykazuje bardzo ograniczoną przydatność, podobnie jak szereg tzw. badań innowacyjnych, których twórcy ciągle poszukują dla nich praktycznej przydatności. Nadal największe znaczenie posiada planowanie badań i interpretacja ich wyników, gdyż badania to tylko część diagnostyki.

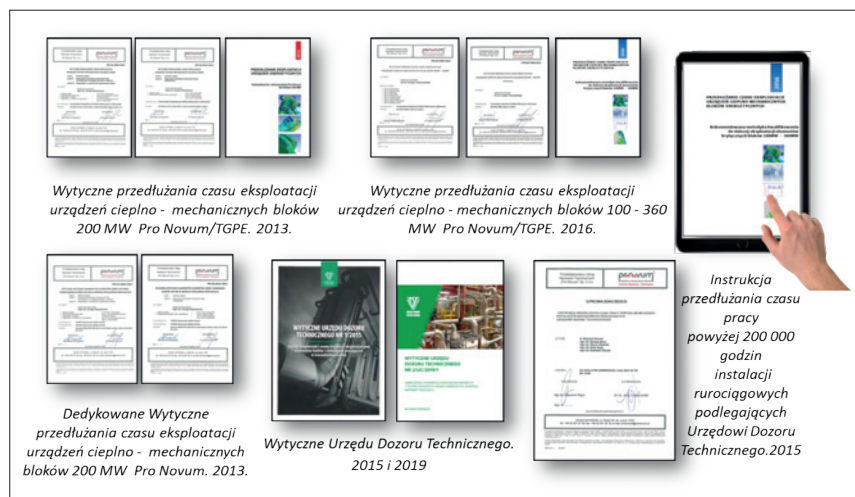
W zakresie oceny stanu technicznego oraz prognozowania trwałości i przedłużania eksploatacji należy korzystać z Wytycznych UDT oraz „Wytycznych przedłużania eksploatacji ...” opracowanych przez *Pro Novum* z pomocą specjalistów większości polskich elektrowni. Ich przydatność została potwierdzona zwłaszcza na urządzeniach niepodlegających UDT. Wytyczne opracowane przez *Pro Novum* wykorzystują wyniki badań niszczących elementów bloku 200 MW wyłączonych z eksploatacji po przepracowaniu 250 tys. godz. [8-11], rysunek 5. Mogą one wspierać przedłużanie eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków energetycznych klasy 200 MW – 360 MW

(a także o mniejszej mocy) w perspektywie ok. 350 000 godz. Część urządzeń czy ich elementów pracuje (bądź pracowało) ponad 300 tys. godzin. Uwzględniając jednak postęp wiedzy i technologii, jaki dokonał się w okresie od 2013 roku zamierzamy wydać nową wersję tych dokumentów, w pierwszej kolejności dotyczących przedłużania eksploatacji turbozespołów oraz bloków eksploatowanych w nowych, bardziej regulacyjnych reżimach pracy. Dotychczasowe doświadczenia przekonują nas, że jest to możliwe i może być bezpieczne.

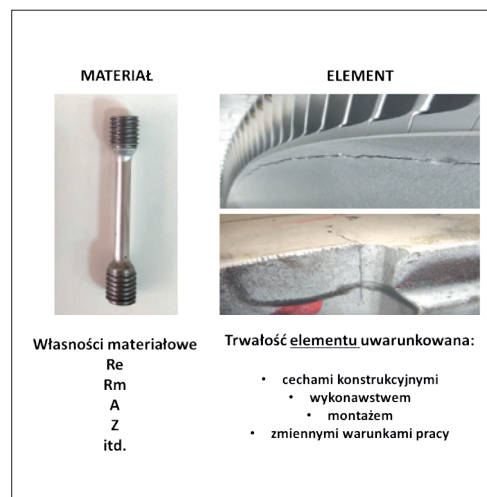
Własności materiałowe a stopień wyczerpania trwałości (SWT)

Nierzadko można spotkać się z określeniem „wyczerpanie trwałości materiału”, co jest określeniem błędnym. W przypadku materiału możemy mieć wyłącznie do czynienia z degradacją własności: fizycznych, termicznych, mechanicznych czy wytrzymałościowych. Dopiero w przypadku elementu o określonej geometrii i technologii wykonania, z materiału (materiałów) o określonych własnościach jw., można mówić o trwałości (czy SWT) uwarunkowanej jego: cechami konstrukcyjnymi, wykonawstwem, montażem i zmiennymi warunkami pracy; w przypadku elementów krytycznych są nimi obciążenia mechaniczne (ciśnienie, obroty) i cieplne. Ogólnie rzecz ujmując SWT dotyczy elementu, a nie materiału, z którego został wykonany, a jego wartość zależy od jego konstrukcji (karby geometryczne i strukturalne) i zmiennych obciążeń cieplno-mechanicznych, a także od jakości montażu, remontu czy modernizacji, które mogą być źródłem dodatkowych naprężeń nieprzewidzianych przez konstruktora (rys. 6).

Należy pamiętać, że trwałość nie tylko ulega wyczerpaniu, ale można ją także przywracać do stanu nawet jak dla nowego elementu wykonując jego regenerację (rodzaj zaawansowanej naprawy) oraz rewitalizację struktury materiału. Takie procesy są od lat stosowane podczas modernizacji i remontów turbozespołów [5, 6]. Największą popularność i największe korzyści dla właścicieli urządzeń przyniosły, i nadal przynoszą, rewitalizacje stalowych elementów turbin [7].



Rys. 5. Wytyczne wspierające planowanie badań i interpretację wyników oraz przedłużanie eksploatacji



Rys. 6. Własności materiałowe a stopień wyczerpania trwałości elementu

Diagnostyka w ostatniej fazie eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych

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

Zwiększanie częstotliwości i zakresów 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 klasy 200 MW (i znaczna część pozostałych) nie przepracują więcej niż ok. 70 tys. godzin. W tym czasie, z inżynierskiego punktu widzenia wystarczy wykonać 2 razy kompleksową diagnostykę, przyjmując, że w okresie ostatnich 4-5 lat taka diagnostyka już miała miejsce. Nie można wykluczyć dodatkowych badań zwłaszcza w przypadku wystąpienia awarii. Liczba badań nie przechodzi automatycznie w użyteczną wiedzę. Można wskazać konkretne przypadki, gdy olbrzymia, idąca w tysiące (na jednym bloku) liczba zbadanych miejsc metodą replik nie miała istotnego znaczenia dla wykrycia rzeczywistych, poważnych problemów związanych z uszkodzeniami o charakterze termozmęczeniowym.

Potwierdzenie przydatności badań innowacyjnych wymaga weryfikacji na wielu obiektach. Trudno wskazać techniki badania, które pojawiły się w ostatnim czasie i wniosły dodatkową istotną wiedzę o stanie technicznym elementów i urządzeń. Nasze doświadczenia wskazują, że nawet znane od dłuższego czasu techniki badania, jak np. PA (*Phase Array*) czy ToFD (*Time of Flight Diffraction*) wymagają jeszcze dopracowania, jeśli z praktycznym pożytkiem mają być wykorzystywane do badań niektórych elementów.

W ostatniej fazie eksploatacji możemy się spodziewać uszkodzeń o charakterze zmęczeniowym (termozmęczeniowym). Identyfikację miejsc ich występowania można wykonywać przy pomocy badań nieniszczących NDT, ale także analitycznie, tj. analizując w odpowiedni sposób pracę bloku, urządzeń i elementów. 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 [14, 15]. 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.

Metodykę diagnostyki w ostatniej fazie eksploatacji bloków i urządzeń energetycznych przedstawiono na rysunku 7. Istotną rolę będą odgrywać badania niszczące elementów wycofanych z eksploatacji, wymiana informacji i kreowanie wspólnej wiedzy oraz nadzór diagnostyczny towarzyszący w czasie rzeczywistym eksploatacji.



Rys. 7. Metodyka diagnostyki w ostatniej fazie eksploatacji bloków w coraz bardziej regulacyjnym trybie pracy

Odpowiednio zorganizowana i wykonywana analiza awaryjności w skali bloków energetycznych jednej klasy oraz analiza wyników badań elementów wycofanych z eksploatacji powinny stanowić podstawę systemu diagnostycznego [16, 20].

Zapas trwałości elementów krytycznych

Odpowiednio wykonywana diagnostyka może pomóc w oszacowaniu zapasu trwałości elementów krytycznych z wystarczającą dla praktyki dokładnością. Pozwala także w bezpieczny sposób nadzorować takie elementy, dla których trwałość została już wyczerpana na skutek uszkodzeń, których naprawa jest niemożliwa do wykonania lub ich wymiana czy naprawa stają się nieoptyczne z uwagi na zbliżający się koniec eksploatacji urządzenia/bloku [13-15].

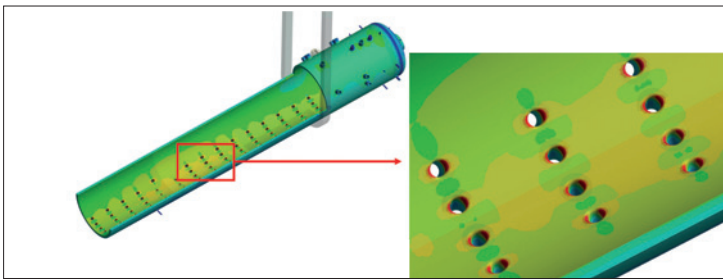
W zapasie trwałości elementu można wyróżnić i odpowiednio wykorzystać trzy fazy jego ubytku (rys. 7).

- Faza I – gdy badania i obliczenia SWT według obowiązujących norm wykazują rezerwę czasu do zainicjowania pęknięcia, a w materiale elementu nie ma zmian strukturalnych.
- Faza II – podczas której istnieje możliwość całkowitego wyczerpania zapasu trwałości, rozumianego jako zainicjowanie pęknięcia identyfikowanego podczas badań NDT oraz obliczeń wskazujących wartość SWT = 1 (100%). Wyniki obliczeń SWT w Fazie II wskazują wyłącznie na lokalne wyczerpanie trwałości, co nie wyklucza dalszej eksploatacji elementu po wykonaniu naprawy (jeśli jednocześnie materiał w miejscu uszkodzenia zmęczeniowego nie wykazuje objawów pełzania wykluczających naprawę przez spawanie).
- Faza III – gdy lokalny zapas trwałości został wyczerpany, a zidentyfikowane pęknięcia elementu są nienaprawialne (np. na powierzchni wewnętrznej komory czy kolektora).

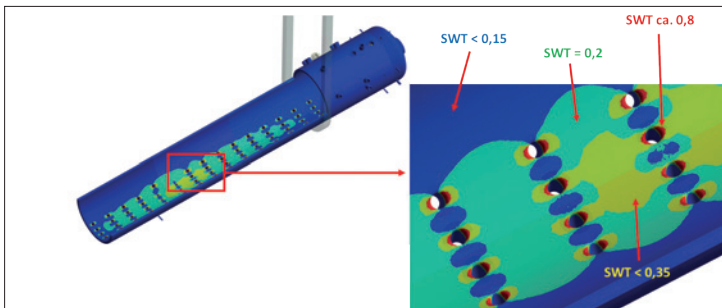
W tej fazie element może pracować wyłącznie w trybie nadzoru nad warunkową eksploatacją, jeśli analiza bezpieczeństwa elementu na to pozwala [13], co oznacza wykonanie obliczeń dotyczących możliwości rozwoju pęknięć według kryteriów mechaniki pęknięcia, z monitoringiem warunków pracy i okresowo wykonywanymi badaniami NDT.



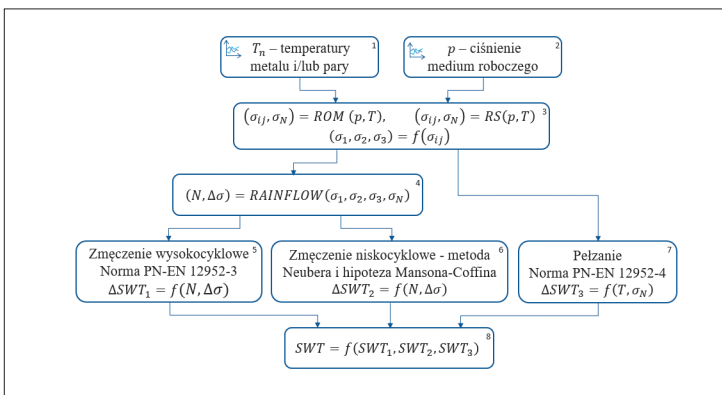
Rys. 8. Określanie zapasów trwałości elementów krytycznych urządzeń do pełnego wyczerpania ich trwałości z uwzględnieniem kontroli propagacji pęknięć (według kryteriów mechaniki pęknięcia)



Rys. 9. Przykład rozkładu naprężeń zredukowanych w płaszczu walczaka



Rys. 10. Walczak – obszary o zróżnicowanych wartościach SWT w obrębie jednego elementu krytycznego



Rys. 11. Algorytm obliczeń SWT według normy PN-EN-12952 część 3 i 4

Konstrukcja elementu krytycznego poddanego cyklicznym obciążeniom cieplno-mechanicznym wywołuje na ogół zróżnicowany stan naprężeń w różnych jego obszarach (rys. 9). Cykle naprężeń są skutkiem: uruchomień, pracy regulacyjnej, odstawień urządzeń i stanów awaryjnych. Kolejnym czynnikiem generującym dodatkowe naprężenia w elemencie krytycznym mogą być błędy montażowe, remontowe czy modernizacyjne. Oznacza to, że w elementach można identyfikować zarówno miejsca o zróżnicowanych wartościach SWT jak również dodatkowe, RSU strefy uszkodzeń (rys. 10).

Rezultaty analizy naprężeń i temperatur wykorzystuje się do wyznaczenia cykli naprężeń w poszczególnych PSU i RSU oraz, po ich systematyzacji metodą *rain-flow*, wykorzystuje się do obliczeń zgodnie z normą PN-EN-12952 część 3 i 4, których algorytm przedstawiono na rysunku 11.

W normie PN-EN-12952 opisano także sposób określania SWT od pełzania:

$$T_{ai} = 10^C, \quad C = C_{1p} + C_{2p} \frac{\log\left(\frac{0.8R_{z,t,100000}}{\sigma_N}\right)}{\log\left(\frac{R_{z,t,100000}}{R_{z,t}}\right)}, \quad (1)$$

gdzie wartości współczynników C_{1p} i C_{2p} określa się dla danego materiału z krzywych wytrzymałości na pełzanie.

Ubytek trwałości dla danej klasy B_i oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$B_i = \frac{T_{oi}}{T_{ai}}, \quad (2)$$

gdzie T_{oi} – czas pracy w danej klasie. Całkowity ubytek SWT liczony jest jako suma ubytków z każdej klasy:

$$\Delta SWT_3 = \sum_i B_i. \quad (3)$$

Czynności te wykonuje program komputerowy tworząc dwuwymiarową siatkę, dyskretyzując czas pracy z uwzględnieniem zakresów temperatur i naprężeń.

Po określeniu średniej wartości naprężenia w danej klasie możliwe jest obliczenie dopuszczalnej teoretycznej trwałości ze wzoru:

$$T_{ai} = 10^C, \quad C = C_{1p} + C_{2p} \frac{\log\left(\frac{0.8R_{z,t,100000}}{\sigma_N}\right)}{\log\left(\frac{R_{z,t,100000}}{R_{z,t}}\right)}, \quad (4)$$

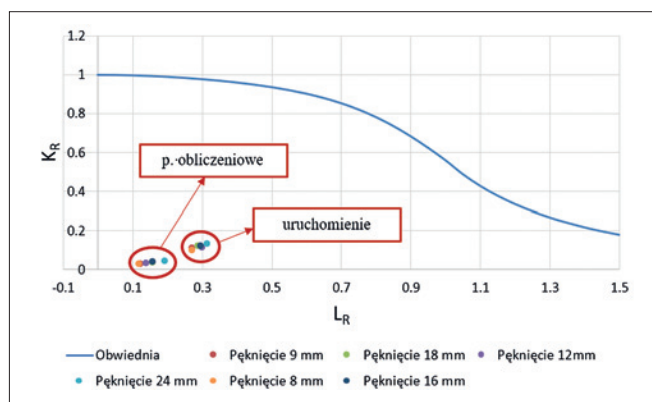
gdzie wartości współczynników C_{1p} i C_{2p} określa się dla danego materiału z krzywych wytrzymałości na pełzanie.

To bardzo uproszczony sposób liczenia SWT dla elementów eksploatowanych powyżej temperatury granicznej, tym bardziej że norma nie uwzględnia ewentualnej interakcji zmęczenia i pełzania.

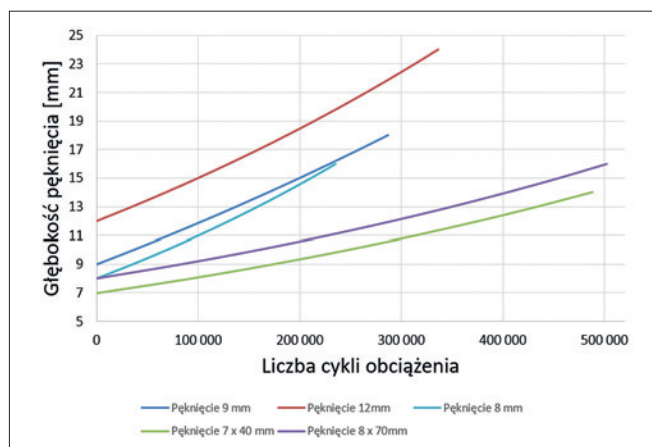
Ocenę bezpieczeństwa pracy elementów z pęknięciami eksploatacyjnymi o charakterze zmęczeniowym najlepiej (na podstawie naszych wieloletnich doświadczeń) wykonywać według normy BS 7910 – 2013+A1:2015 [13]. Obliczenia wykonywane są dwuetapowo:

- etap 1 – ustalenie czy uszkodzony element może zostać dopuszczony do pracy (na podstawie analizy obwiedni Lr-Kr oraz analizy LBB), (rys. 12);
- etap 2 – określenie bezpiecznego czasu pracy/ liczby cykli naprężeń do momentu osiągnięcia przez pęknięcie rozmiarów wywołujących jego dalszy niestabilny rozwój; obwiednia Lr-Kr obrazuje bezpieczeństwo pracy elementu ze względu na graniczne stany plastyczne (zdolność materiału do przenoszenia obciążenia w rejonie pęknięcia) oraz na graniczne stany związane z samym pęknięciem, tj. przekroczenie krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężeń, co mogłoby wywołać niekontrolowaną jego propagację.

Na podstawie analizy numerycznej określa się, w jakim obszarze Kr-Lr znajduje się aktualnie element i czy może on dalej bezpiecznie pracować (rys. 12). Obliczeniom rozwoju pęknięcia towarzyszy zbadanie zmiany współczynnika intensywności naprężeń w zależności od głębokości pęknięcia, a następnie wykorzystując prawo Parisa oblicza się liczbę cykli wywołujących kolejne przyrosty głębokości pęknięcia, aż do rozmiaru uznanego za niebezpieczny (rys. 13).



Rys. 12. Analiza bezpieczeństwa z wykorzystaniem obwiedni Lr-Kr według normy BS 7910 – 2013+A1:2015



Rys. 13. Głębokość pęknięcia w zależności od liczby cykli na podstawie prawa Parisa według normy BS 7910 – 2013+A1:2015

Wykorzystanie bliźniaków cyfrowych do oceny zapasów trwałości elementów krytycznych

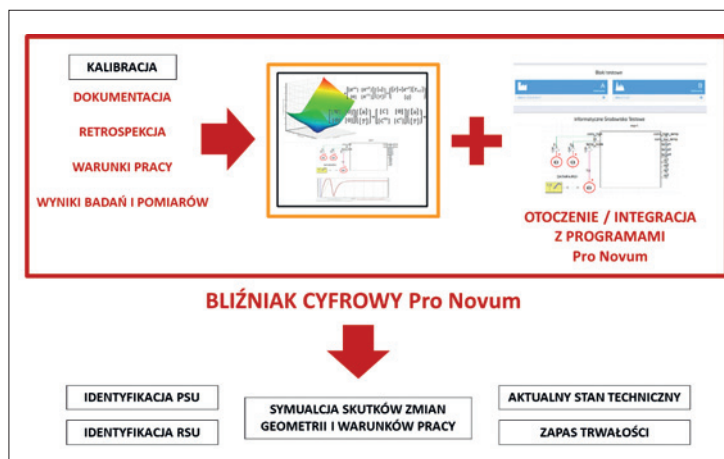
Monitorowanie stopnia wykorzystania zapasów trwałości elementów krytycznych na skutek zmęczenia, także w warunkach pełzania, można z dużą dokładnością określać na podstawie analizy rzeczywistych warunków ich pracy, wykorzystując w tym celu parametryczne bliźniaki cyfrowe (*Digital Twin*).

Modelowanie MES pozwala dokładniej liczyć naprężenia niż obliczenia analityczne ze względu na brak potrzeby uwzględnienia wielu czynników wpływających na stan naprężenia wymaganych w metodach analitycznych. Największym utrudnieniem dla metod analitycznych jest skomplikowana geometria obiektu, która może prowadzić do wzajemnego wpływu na stan naprężeń cech geometrycznych elementów. Metody analityczne bronią się w takich przypadkach różnymi współczynnikami, ustalonymi metodami eksperymentalnymi czy właśnie numerycznymi, jednak nie ma możliwości przewidzenia analitycznie wszystkich kombinacji położenia np. króćców, otworów, wybrań itp. Kolejnym problemem jest brak możliwości określenia naprężeń od niestabilnych stanów termicznych za pomocą metod analitycznych. Nawet jeśli występują wzory opisujące np. stan ustalony czy stały gradient naboru temperatury, to nie mają one przełożenia na rzeczywiste warunki pracy np. podczas uruchomień. Dodatkowo wzory analityczne pozwalają zwykle na określenie tylko niektórych składowych stanu naprężenia. Chociażby te dwa przykłady bezpośrednio wskazują nie tylko na większą dokładność metod numerycznych, ale zwłaszcza na możliwość wykonania w ogóle wiarygodnych obliczeń.

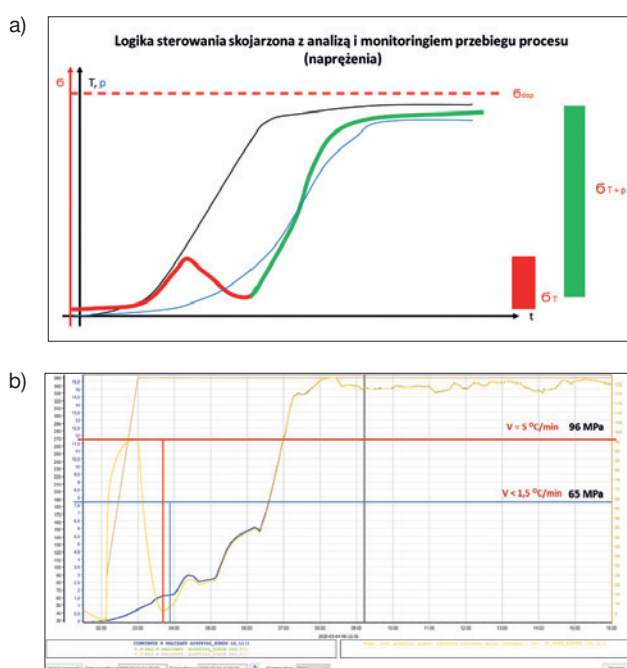
Bliźniaki cyfrowe urządzeń energetycznych zaimplementowaliśmy na specjalnie w tym celu przygotowanej platformie LE-Platform-DT PRO® (rys. 14, 17), które wraz z pozostałymi jej modułami umożliwiają analizę wyęźnienia elementów i jego skutków na podstawie rzeczywistych warunków pracy. Wyniki analizy naprężeniowej wygenerowane z wykorzystaniem cyfrowych bliźniaków stanowią parametry wejściowe do procedur obliczeniowych dla oceny zapasów trwałości także z możliwością zapewnienia bezpieczeństwa elementów w Fazie III wyczerpania trwałości.

Ważną cechą cyfrowych bliźniaków, oprócz bieżącej analizy naprężeniowej i trwałościowej, jest także możliwość symulowania innych/zmiennych warunków pracy. W przypadku planowanej zmiany reżimu pracy urządzeń i instalacji, w szybki i bezpieczny sposób, z ich pomocą, możliwe jest sprawdzenie czy planowane zmiany mają istotny wpływ na wyęźnienie i zmianę zapasu trwałości elementów. Przeprowadzone symulacje np. szybszych uruchomień bloku – szybsze nabory temperatury pary nasyconej, świeżej czy wtórnej – udowodniły wzrost naprężeń cieplnych w elementach ciśnieniowych wyłącznie w pierwszej fazie ich uruchomienia. Był to jednak poziom naprężeń daleki od dopuszczalnych, a ich maksymalne wartości uzyskiwano w innym momencie niż maksimum naprężeń sumarycznych (cieplne plus mechaniczne) – rysunek 15. Symulacje takie umożliwiają także wprowadzenie odpowiednich korekt w procedurach diagnostycznych, np. z uwagi na identyfikację nowych potencjalnych stref uszkodzeń.

Możliwość symulacji warunków przyszłej eksploatacji wykorzystujemy także jako podstawę obliczeń SWT oraz prognozowania trwałości podczas przedłużonej eksploatacji bloków przy nowych reżimach pracy.



Rys. 14. Podstawowe cechy oraz najważniejsze funkcje parametrycznego bliźniaka cyfrowego *Pro Novum*



Rys. 15. Symulacja zmiennych warunków pracy z wykorzystaniem cyfrowych bliźniaków elementów krytycznych urządzeń energetycznych
 a) udział naprężeń cieplnych i ciepłno-mechanicznych w elemencie ciśnieniowym podczas uruchamiania bloku,
 b) symulacja szybszego naboru temperatury pary nasyconej w walczaku kotła, naprężenia cieplne ver. naprężenia ciepłno-mechaniczne

System Diagnostyczny wspierający przedłużanie eksploatacji

Znaczący udział w możliwości zrealizowania takiej strategii, zwłaszcza w przypadku bloków klasy 200 MW, ma diagnostyka realizowana w sposób systemowy, która w stopniu większym niż dotąd powinna korzystać z wiedzy i wieloletnich doświadczeń. Na ich podstawie stworzyliśmy zaawansowane technologicznie narzędzia do obliczeń analitycznych, modelowania elementów konstrukcji i instalacji oraz niektórych procesów mających wpływ na trwałość elementów, np. erozji łopatek turbin podczas pracy bloków przy obniżonym minimum technicznym.

Wykorzystaliśmy także współczesne technologie informatyczne do zaimplementowania Wirtualnego Środowiska Diagnostycznego oraz jego zdalnej komunikacji z diagnozowanymi przez nas urządzeniami energetycznymi [23]. Stworzyliśmy nowoczesny system diagnostyczny jako proces powiązany z procesem eksploatacji. Jego architektura została zilustrowana na rysunku 16, a interfejs do platformy informatycznej, na której został zaimplementowany, na rysunku 17. Podstawową funkcją Systemu Diagnostycznego jest systematyczne aktualizowanie oceny stanu technicznego oraz nadzorowanie aktualnych zapasów trwałości elementów krytycznych.

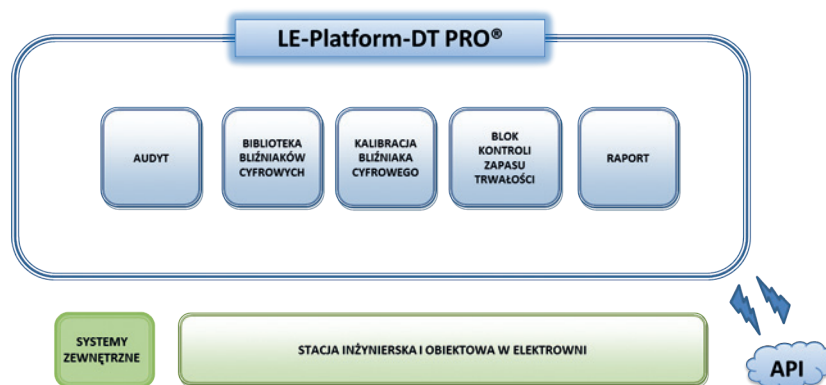
Najważniejsze funkcje poszczególnych modułów platformy można scharakteryzować następująco:

- AUDYT – realizuje proces zgodnie ze schematem na rysunku 4, także w zakresie przeglądu i uzupełnienia systemu pomiarowego,
- BIBLIOTEKA BLIŹNIAKÓW CYFROWYCH – aktualnie zawiera zbiór 35 elementów krytycznych bloków klasy 200 MW,
- KALIBRACJA BLIŹNIAKA CYFROWEGO – na podstawie retrospekcji,
- BLOK KONTROLI ZAPASU TRWAŁOŚCI – wylicza aktualną wartość SWT i zapasu trwałości na podstawie kryteriów naprężeniowych zamiast temperaturowych (BOT) jak to jest aktualnie powszechnie stosowane,
- RAPORT – prezentuje i udostępnia okresowo ocenę stanu technicznego i prognozę trwałości wraz z zaleceniami diagnostycznymi.



Rys. 16. Schemat procesu określania zapasów trwałości elementów krytycznych bloków/urządzeń energetycznych w przedłużonym czasie eksploatacji i dowolnym trybie pracy

Rys. 17. Interface główny prezentujący funkcje poszczególnych modułów platformy informatycznej integrującej oprogramowanie wspierające ocenę stanu technicznego elementów krytycznych oraz jej aktualizację, jak również bieżącą weryfikację zapasów trwałości



Podsumowanie i wnioski

Wyniki dotychczas wykonanych badań bloków klasy 200 MW wskazują, że ich eksploatację można kolejny raz przedłużyć oraz przystosować je do bardziej regulacyjnego niż dotąd trybu pracy, wykorzystując zidentyfikowane zapasy trwałości elementów długo eksploatowanych, a w niektórych przypadkach wymienić nadmierne wyczerpane elementy lub je zrewitalizować. Samą poprawę elastyczności bloku można osiągnąć w różny sposób w zależności od tego, które jej cechy zamierzamy poprawić, jakie problemy techniczne zostaną zidentyfikowane podczas jego audytu oraz jakie dodatkowe warunki powinny zostać spełnione, np. współspalanie dużych ilości biomasy. Najbardziej racjonalne wydaje się zwiększenie elastyczności w takim zakresie, aby maksymalnie wykorzystać zidentyfikowane zapasy trwałości elementów bloku i w systemie sterowania, a blok wyposażić w system diagnostyczny zintegrowany z systemem sterowania w taki sposób, żeby zapewnić jego bezpieczeństwo. Taki system diagnostyczny opisano w niniejszym artykule oraz w wielu innych publikacjach, np. [17-23].

Szczególną rolę w tym systemie odgrywają cyfrowe bliźniaki elementów krytycznych (grubościennych), a nawet całych instalacji rurociągowych. Swoją znaczącą rolę zawdzięczają temu, że wyposażono je we wszystkie istotne informacje z retrospekcji oraz posiadają wyjątkowo wiele funkcji analitycznych. Wraz z programami zaimplementowanymi na platformie LE-Platform-DT PRO® realizują wszystkie funkcje wsparcia dla specjalistów utrzymania majątku. Mogą także wspierać pracę operatora bloku i komunikować się ze specjalistami firm i instytucji zewnętrznych przez API (rys.17), za zgodą właściciela bloku.

Postępowanie się zapasem trwałości, traktując SWT obliczanym na podstawie normy PN-EN-12952 jako orientacyjny wskaźnik przydatności elementu do dalszej eksploatacji, ma sens z wielu względów:

- dla elementów pracujących powyżej temperatury granicznej obliczeniowe SWT od pełzania może być zweryfikowane i skorygowane na podstawie badań mikrostruktury oraz pomiarów deformacji;
- dla elementów pracujących powyżej temperatury granicznej, ale także narażonych na termozmęczenie i/lub termosok, obliczeniową wartość SWT można traktować tylko jako wartość orientacyjną, zwłaszcza gdy naprężenia liczone są analitycznie;

- dla elementów eksploatowanych poniżej temperatury granicznej, gdy wyczerpanie trwałości następuje na skutek zmęczenia cieplno-mechanicznego (niekiedy z udziałem korozji naprężeniowej) obliczeniowo, analitycznie wyznaczone SWT napotyka zarówno problemy jw. jak również znaczne i dotąd nierozwiązane problemy interpretacyjne, ponieważ:
 - nie uwzględnia się historii w zakresie uszkodzeń, w tym przyczyn pierwotnych oraz pośrednich ich powstania,
 - utożsamia się SWT, które jest zawsze w takich przypadkach lokalne, z wyczerpaniem trwałości całego elementu lub jego części (np. cargi w walczaku),
 - nie uwzględnia się skutków różnego rodzaju napraw;
- inicjacja pęknięcia nie oznacza wyczerpania trwałości elementu, nawet wtedy, gdy nie może zostać ono naprawione, bo:
 - pęknięcia termosokowe nie muszą propagować, gdy wpływ termoszoku zostanie wyeliminowany lub ograniczony,
 - pęknięcia, zanim osiągną rozmiary niebezpieczne, można – zgodnie z posiadaną od dawna wiedzą nie tylko inżynierską, ale także naukową, zaimplementowaną także w postaci norm – skutecznie kontrolować nawet w długim okresie.

Z prognozowania trwałości, zwłaszcza dla elementów krytycznych urządzeń cieplno-mechanicznych, nie można zrezygnować, bo:

- od wielu lat eksploatowane są w warunkach, do jakich nie zostały zaprojektowane,
- od dawna duża część elementów i węzłów konstrukcyjnych pracuje ponad czas obliczeniowy,
- eksploatowane będą w trybie coraz bardziej regulacyjnym.

Postępowanie się pojęciem zapasu trwałości przywraca sens fizyczny wskaźnikowi określającemu aktualny stopień jego wyczerpania. Sprawia to, że bezpieczny czas pracy elementów można prognozować w bliższym niż dotąd związku z ich aktualnym stanem technicznym, radząc sobie zarówno z często występującymi brakami w zakresie historii eksploatacji jak również z trudnymi do przewidzenia warunkami dalszej pracy i ich skutku. Rzeczywisty zapas trwałości można w większym niż dotąd stopniu wykorzystać jak również zwiększyć bezpieczeństwo eksploatacji.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Sprawozdanie Pro Novum nr 108.3690/2018. Niepublikowane.
- [2] Sprawozdanie Pro Novum nr 001.3914/2020. Niepublikowane.
- [3] Trzeczcyński J., *System diagnostyczny zapewniający bezpieczną pracę bloków 200 MW eksploatowanych po przekroczeniu 300 000 godzin*. „Dozór Techniczny” 2012, nr 2.
- [4] Trzeczcyński J., *Aktualny stan techniczny oraz możliwości dalszej eksploatacji konwencjonalnych źródeł wytwórczych*. Monografia II Kongresu Elektryki Polskiej, tom II, grudzień 2014 - wrzesień 2016.
- [5] Trzeczcyński 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.
- [6] Grzesiczek E., Trzeczcyński J., Rajca S., *Możliwości wydłużenia czasu eksploatacji elementów części przepływowych turbin parowych*. „Energetyka” 2003, nr 12.
- [7] Grzesiczek E., Rajca S., *Rewitalizacja stalowych elementów turbin parowych – technologia bez mankamentów*. „Energetyka” 2012, nr 12.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] PN/045.3360/2016: *Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 100-360 MW*. Pro Novum. Katowice 2016. Niepublikowane.
- [12] 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.
- [13] BS 7910 – 2013+A1:2015: *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*.
- [14] 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.
- [15] Wojciechowski R.M., Trzeczcyński J., Murzynowski W., *Przykład realizacji nadzoru diagnostycznego bloku BC50*. „Energetyka” 2022, nr 12, Biuletyn Pro Novum 3/2022.
- [16] Stanek R., Trzeczcyński 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.
- [17] Trzeczcyński J., *Diagnostyka wspierająca bezpieczeństwo i dyspozycyjność bloków klasy 200 MW podczas kontynuowania ich eksploatacji*. „Dozór Techniczny” 2023, nr 2.
- [18] Trzeczcyński J., Hałas M., Murzynowski W., *Wykorzystanie parametrycznych bliźniaków cyfrowych do analizy trwałości kadłubów turbiny podczas uruchomień*. „Energetyka” 2022, nr 6, Biuletyn Pro Novum 1/2022.
- [19] Murzynowski W., *Wykorzystanie zdalnej diagnostyki i mechaniki pękania do zapewnienia bezpieczeństwa i dyspozycyjności w końcowej fazie eksploatacji elementów i urządzeń energetycznych*. VII Konferencja Techniczna „Utrzymanie ruchu – diagnostyka, remonty, modernizacje”. 17-18 marca 2021.
- [20] Trzeczcyński J., *Bezpieczeństwo i dyspozycyjność urządzeń energetycznych w ostatniej fazie ich eksploatacji*. „Energetyka” 2019, nr 6, Biuletyn Pro Novum 1/2019.
- [21] Trzeczcyński J., Hałas M., Murzynowski W., *Korzyści z zastąpienia kryteriów temperaturowych przez naprężeniowe dla zapewnienia bezpieczeństwa i dyspozycyjności bloków energetycznych eksploatowanych w trybie regulacyjnym oraz o zwiększonej elastyczności*. „Energetyka” 2022, nr 12, Biuletyn Pro Novum 2/2022.
- [22] Hałas M., Murzynowski W., Trzeczcyński J., *Parametryczne bliźniaki cyfrowe źródłem informacji i wiedzy dla bezpiecznej eksploatacji urządzeń i instalacji energetycznych*. „Energetyka” 2022, nr 12, Biuletyn Pro Novum 3/2022.
- [23] Trzeczcyński J., Galbarczyk P., Murzynowski W., Stanek R., Hałas M., Kusibab M.: *Wykorzystanie zapasów trwałości oraz rezerw po stronie sterowania dla zwiększenia elastyczności bloków klasy 200 MW*. „Energetyka” 2022, nr 12, Biuletyn Pro Novum 3/2022.

Zagrożenia korozyjne na blokach energetycznych o zwiększonej elastyczności

Corrosion hazards in flexible power units operations

Problemy korozyjne nieodłącznie towarzyszą pracy bloków energetycznych niezależnie od trybu ich pracy. Rozpoznane i opanowane w stopniu wystarczającym zjawiska korozyjne na blokach pracujących w trybie normalnym, w przypadku bloków pracujących w trybie intensywnej regulacji i zwiększonej elastyczności, nabierają nowego wymiaru. Do typowych mechanizmów niszczenia dochodzą czynniki charakterystyczne dla elastycznego trybu pracy bloków, istotne z punktu widzenia intensyfikacji procesów niszczenia korozyjnego. Elastyczne warunki pracy urządzeń wytórczych generują nowy zakres zjawisk o potencjale zjawisk korozyjnych. Systemowe podejście do przetwarzania informacji, w tym danych diagnostycznych, daje szansę na podjęcie adekwatnych do zagrożenia działań prewencyjnych i utrzymanie dobrego stanu technicznego urządzeń.

Słowa kluczowe: zagrożenia korozyjne, bloki energetyczne, tryb pracy normalny, tryb intensywnej regulacji i zwiększonej elastyczności

Corrosion problems are inherent in the operation of power units, regardless of the mode of their operation. Corrosion phenomena, known and controlled to a sufficient degree, on power units operating in the normal mode, in the case of units operating in the mode of intensive regulation and increased flexibility, take on a new dimension. In addition to the typical destruction mechanisms, there are factors characteristic of the flexible mode of operation of blocks, important from the point of view of intensifying the processes of corrosion destruction. Flexible operating conditions of production equipment generate a new range of corrosive phenomena. A systemic approach to information processing, including diagnostic data, gives a chance to take preventive measures adequate to the risk and maintain good technical condition of power plant units.

Keywords: corrosion hazards, power units, normal operation mode, intensive regulation mode and increased flexibility

Wstęp

Problemy korozyjne nieodłącznie towarzyszą pracy bloków energetycznych niezależnie od trybu ich pracy. Rozpoznane i opanowane w stopniu wystarczającym zjawiska korozyjne na blokach pracujących w trybie normalnym, w przypadku bloków pracujących w trybie intensywnej regulacji i zwiększonej elastyczności nabierają nowego wymiaru. Do typowych mechanizmów niszczenia dochodzą czynniki charakterystyczne dla elastycznego trybu pracy bloków, istotne z punktu widzenia intensyfikacji procesów niszczenia korozyjnego. Nowe warunki eksploatacji, powstałe w związku z uelastycznieniem pracy bloków, generują nowy zakres zjawisk o potencjale zjawisk korozyjnych. Jeżeli przez uelastycznienie rozumiemy również rozszerzenie lub zmianę rodzaju spalane go paliwa, również w układzie mieszanek paliwowych, obszar elementów zagrożonych korozją ulega znaczącemu rozszerzeniu. Wymuszona zmiana jakości spalane go paliwa to jedna z bolączek, jakie pojawiły się w związku z zaistniałą sytuacją geopolityczną i źródło problemów w obszarze trwałości elementów danej jednostki, gdzie wcześniej nie identyfikowano problemów korozyjnych.

Właściwa i możliwie szybka identyfikacja rzeczywistych zagrożeń korozyjnych daje szansę na podjęcie adekwatnych do zagrożenia działań prewencyjnych i utrzymanie dobrego stanu technicznego urządzeń z ograniczeniem przypadków uszkodzeń związanych z korozją.

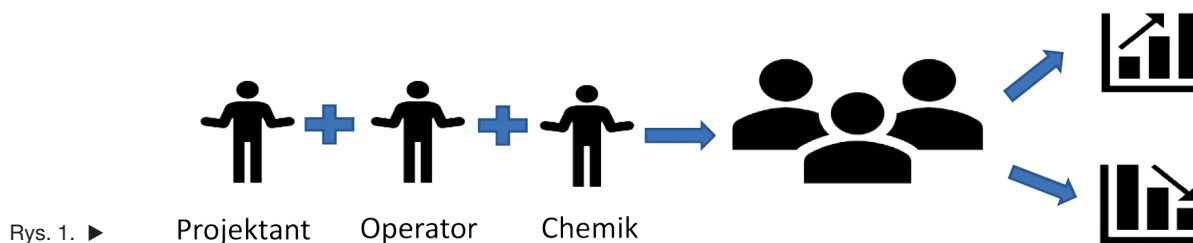
Korozja

Korozja, jako zjawisko, tradycyjnie kojarzona jest jako negatywne oddziaływanie środowiska na materiały konstrukcyjne elementów danego układu technologicznego i zwykle z materiałami

wykonanymi z metalu. Problem korozji, rozumianej jako utrata i zwykle pogorszenie pierwotnych własności, dotyczy oczywiście znacznie szerszego wachlarza materiałów konstrukcyjnych, począwszy od materiałów niemetalicznych (beton, drewno, szkło i in.) kończąc na tworzywach sztucznych. Dobór odpowiedniego materiału do rodzaju środowiska pozostające go z nim w kontakcie jest jednym z głównych czynników pozwalających na ograniczenie strat (w pieniądzu, w dyspozycyjności, w trwałości) związanych z procesami korozyjnymi. Dla jednorodnych środowisk i stabilnych parametrów pracy (m.in. ciśnienie, temperatura) wybór odpowiedniego gatunku materiału konstrukcyjnego pod kątem odporności korozyjnej wydaje się i zwykle jest sprawą dość prostą, związaną ze sprawdzeniem zapisów odpowiednich tabel odporności korozyjnej i wyborem danego materiału, gdzie praktycznie jedynym czynnikiem, który kieruje wyborem jest cena danego materiału.

Dużo trudniejsze zadanie stoi przy wyborze materiału konstrukcyjnego dla środowiska o zmiennych, często skrajnie odległych właściwościach (np. ogień i woda dla rur parowników kotłów), gdzie oprócz ryzyk związanych z charakterystyką samego środowiska w zakresie parametrów fizycznych (ciśnienie, temperatura) oraz chemicznych, dochodzi mnogość możliwych mechanizmów niszczenia korozyjnego, tak prostych, jak np. korozja wżerowa (pitting), jak i złożonych, jak np. zmęczenie korozyjne czy korozja naprężeniowa. Wieloletnia historia eksploatacyjno-remontowa oraz doświadczenia diagnostyczne pokazują, że dobór odpowiednich materiałów jest możliwy, a uszkodzenia korozyjne, o ile występują, są zwykle powiązane z niedotrzymaniem reżimów pracy lub błędami konstrukcyjnymi czy zakłóceniami technologicznymi.

Gradacja trudności osiąga swoje maksimum w sytuacji, kiedy dla przypadku opisanego powyżej, dodamy cykliczne, zwykle nieregularne zmiany parametrów środowiska, związane



ze zmianą trybu pracy z projektowego na pracę w warunkach intensywnej, wymuszonej przez otoczenie (system energetyczny) pracy w regulacji. Dodatkowym czynnikiem o negatywnym wymiarze oddziaływania, jeszcze do niedawna niebrany poważnie pod uwagę, są kwestie geopolityczne, które jak pokazuje praktyka i rzeczywistość w sposób istotny mogą wpływać na integralność i trwałość urządzeń wytwórczych, między innymi w związku z wymuszonymi zmianami w strukturze dostaw paliwa. Nie bez znaczenia pozostają kwestie czysto ludzkie, dotyczące historycznych przyzwyczajęń obsługi ruchowej, powielającej działania właściwe dla normalnego trybu pracy urządzeń, niekoniecznie optymalne dla trybu zmienionego.

Z trzecim z opisanych przypadków mierzymy się obecnie w trakcie eksploatacji bloków energetycznych, w tym stanowiących w dalszym ciągu podstawę systemu energetycznego bloków 200 i 360 MW, które oprócz funkcji generacyjnej są podstawową grupą urządzeń regulujących system energetyczny.

Nowa sytuacja na rynku wytwarzania energii elektrycznej

Zachodzące zmiany na rynku wytwarzania energii elektrycznej stworzyły sytuację, w której tryb pracy jednostek wytwórczych związany jest z:

- pracą w intensywnej regulacji, zgodnie z zapotrzebowaniem rynku, daleko od założeń projektowych,
- krótkoterminowymi i długoterminowymi postojami w rezerwie,
- odstawieniami z koniecznością zapewnienia dyspozycyjności, ale bez znanego czasu postoju.

Fizykochemiczną konsekwencją tego stanu rzeczy są zwykle:

- zdecydowane pogorszenie fizykochemicznych warunków pracy urządzeń, związane z cykliczną zmianą parametrów czynnika obiegowego,
- pogorszona ochrona antykorozyjna w trakcie pracy i postoju,
- pojawienie się nietypowych przypadków uszkodzeń, niespotykanych przy normalnym trybie pracy oraz intensyfikacja charakterystycznych dla sytuacji przed zmianą,
- potrzeba zmiany metod obróbki chemicznej czynnika obiegowego w układzie wodno-parowym.

Praca bloków energetycznych w warunkach intensywnej regulacji stanowi wielowymiarowe wyzwanie nie tylko dla obsługi ruchowej, ale również dla projektantów, wydziałów kontroli eksploatacji oraz chemików zajmujących się utrzymaniem optymalnych parametrów czynnika w obiegach technologicznych, w tym w obiegu wodno-parowym. Ta współpraca powinna mieć na celu

minimalizację wpływu pracy w intensywnej regulacji, pracy elastycznej na dyspozycyjność i efektywności pracy urządzeń wytwórczych. Zaniechanie działania wiąże się ze wzrostem poziomu ryzyka – rysunek 1.

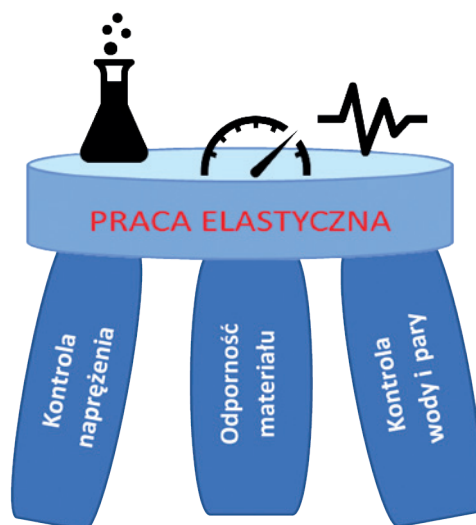
Wyzwania szczegółowe powinny obejmować działania pozwalające na:

- wydłużenie żywotności urządzeń oraz ograniczenie liczby wymuszonych przestojów,
- maksymalizację produkcji energii przy zachowaniu wysokiej sprawności,
- wyeliminowanie lub co najmniej ograniczenie intensywności zjawisk korozyjnych,
- ograniczenie ilości osadów eksploatacyjnych oraz skali ich transportu wewnątrz obiegu.

Praca elastyczna jest ściśle związana z przewijającymi się cyklicznie, charakterystycznymi etapami – stanami ruchowymi obejmującymi m.in. wyłączenie z ruchu, krótszy lub dłuższy postój w rezerwie, ze zmiennym w zależności od sytuacji zakresem zmian parametrów obiegu, uruchomienie do ponownej eksploatacji z ponownym formowaniem parametrów obiegu aż do momentu ponownej synchronizacji z siecią energetyczną i dalszą pracą w regulacji.

Utrzymanie wymaganej trwałości i dyspozycyjności w obrębie wszystkich stanów pracy opiera się na jednoczesnym zabezpieczeniu trzech filarów stanowiących podstawę bezpiecznej pracy w warunkach intensywnej regulacji – rysunek 2.

Bieżąca kontrola stanu naprężeń, połączona z kontrolą i korektą parametrów fizykochemicznych obiegu wodno-parowego, przy uwzględnieniu odporności materiałów konstrukcyjnych, daje szansę na bezpieczną eksploatację w zmienionych warunkach.



Rys. 2.

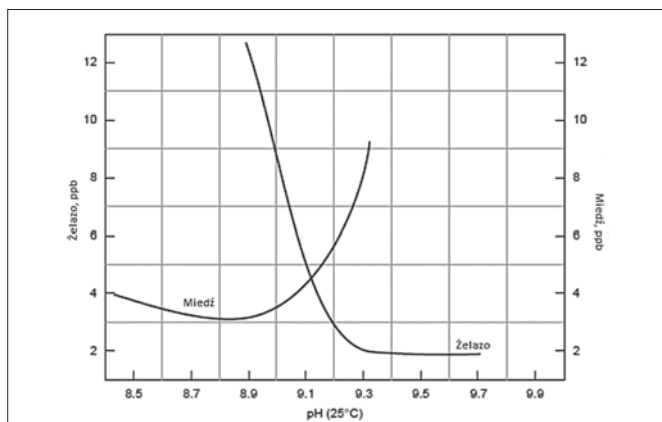
Fizykochemiczne konsekwencje pracy elastycznej

Wraz ze zmianami parametrów wydajnościowych związanych z pracą elastyczną oraz wielokrotnie zwiększoną liczbą rozruchów mamy do czynienia z cyklicznymi zmianami kluczowych parametrów (odczyn pH, potencjał utleniająco-redukcyjny i in.) wpływających niekorzystnie na trwałość warstw ochronnych w obiegu wodno-parowym oraz **intensyfikacją emisji zanieczyszczeń stałych** do czynnika obiegowego. Szczególnie istotnych niekorzystnych zmian należy spodziewać się w związku z intensyfikacją zjawisk związanych z FAC (Flow Accelerated Corrosion), normalnie związanych z turbulencją przepływu i zmianami parametrów kluczowych. W układach z wymiennikami ze stopów miedzi (kondensator, regeneracja NP) wzrasta ryzyko emisji związków miedzi do czynnika obiegowego, z wtórnymi problemami związanymi z jej obecnością na elementach obiegu wodo-parowego – rysunek 3.

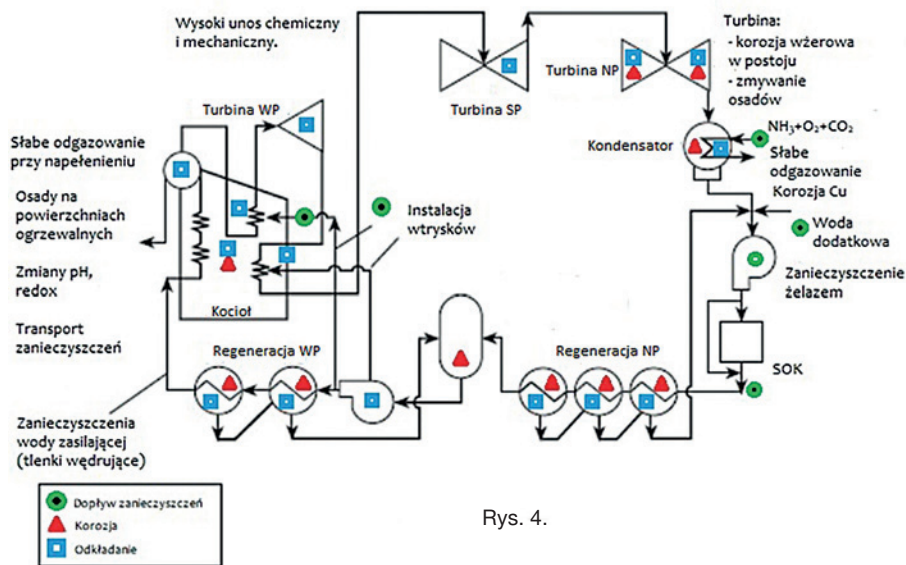
Z uwagi na ogólny, wyższy poziom zanieczyszczeń korozyjnych w obiegu, intensyfikacja odkładania się osadów korozyjnych na powierzchniach ogrzewalnych (**koroza podosadowa**) może być przyczyną powtarzających się uszkodzeń elementów w części wodnej. Szybkie zmiany wydajności to również ryzyko pogorszenia jakości produkowanej pary związane z unosem mechanicznym i chemicznym zanieczyszczeń wody kotłowej do pary. Każdorazowo, niezabezpieczony antykorozyjnie postój, niezależnie od jego długości, to okres przyrostu zawartości produktów korozji i degradacji materiałów konstrukcyjnych.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat typowego obiegu wodno-parowego z wtórnym przegrzewem z zaznaczonymi miejscami występowania zjawisk korozji pierwotnej, miejscami odkładania osadów i ich wtórnego transportu oraz miejsca dopływu zanieczyszczeń spoza obiegu.

Praca elastyczna, praca w intensywnej regulacji, związana jest z szeregiem stanów przejściowych, których efektem oprócz „produkcji” korozji mogą być uszkodzenia elementów urządzeń. Redukcja negatywnego wpływu jest możliwa poprzez podjęcie wielopłaszczyznowych działań korekcyjnych – tabela 1.



◀ Rys. 3.



Rys. 4.

Tabela 1

Wielopłaszczyznowe działania korekcyjne

Efekty przejściowe	Redukcja wpływu
Korozja elementów w trakcie postoju. Transport produktów korozji w trakcie uruchomienia	prawidłowe odstawienie, zabezpieczenie antykorozyjne, filtracja – czyszczenie obiegu po uruchomieniu
Transport zanieczyszczeń tlenkowych wraz z wodą wtryskową do SH, RH i turbiny	odsalanie/odmulanie kotła, oczyszczanie wody zasilającej
Zmiany odczynu pH, redox, temperatury – wzrost zawartości zanieczyszczeń stałych w czynniku	utrzymanie jakości czynnika zgodnie z reżimem
Obecność osadów w układzie przepływowym turbiny, wilgoć, korozja wżerowa	suszenie układu przepływowego, mycie turbin
Doplwy zanieczyszczeń gazowych – korozja wżerowa, spadek pH, FAC	doszczelnienie układu
Słaba efektywność odgazowania czynnika w trakcie uruchomienia	modernizacja układu odgazowania
Wysokie przejściowe naprężenia w elementach grubościennych wynikające ze zmian parametrów w stanach niustalonych, naprężenia w rurach ścian kotłowych, zaburzenia cyrkulacji. Drgania, wzrost naprężeń w elementach wirujących. Przyspieszona korozja naprężeniowa i propagacja pęknięć korozyjno-zmęczeniowych.	kontrola stanu naprężeń, drgań, utrzymanie parametrów czynnika, zmiana korekcji chemicznej
Złuszczenie warstw tlenkowych z powierzchni przegrzewaczy. Ograniczenie przepływu czynnika, awarie armatury, erozja w układzie przepływowym, transport tlenków	ograniczenie szybkości zmian temperatury metalu, efektywne odwadnianie układu, filtracja kondensatu
Korozja przegrzewaczy SH/RH – rozpuszczanie osadzonych soli	zabezpieczenie antykorozyjne
Hide-out	optymalizacja korekcji chemicznej

Tabela 2

Kocioł – mechanizmy niszczenia – chemia – praca elastyczna

Mechanizm	Chemia	Praca elastyczna
Zmęczenie korozyjne	niedotrzymanie parametrów, odstawienia/uruchomienia, błędy czyszczenia chemicznego	zmiany parametrów fiz-chem., zakłócenia cyrkulacji, naprężenia termiczne
Korozja wodorowa	osady wprowadzane z układu zasilającego, obecność kwaśnych soli w osadach	zmiany parametrów fiz-chem., odkładanie stałych produktów korozji
Korozja alkaliczna	osady wprowadzane z układu zasilającego, obecność alkalicznych soli w osadach	Hide-out, zanieczyszczenie powierzchni rur
Korozja ogniowa	mechanizm akcelerowany wzrostem temperatury – obecność osadów	osady na powierzchniach rur
Krótko/długoterminowe przegrzanie	wzrost temp. metalu na skutek obecności osadów, odkładanie osadów w przewężeniach	zanieczyszczenie rur, zaburzenia cyrkulacji
FAC	warunki redukcyjne, niskie pH wody zasilającej	CO ₂ + niskie pH
Korozja wżerowa – ECO	obecność wilgoci, natlenienie w trakcie postoju	postój
Korozja wżerowa – RH	rozpuszczanie soli, obecność kondensatu	postój

Tabela 3

Turbina – mechanizmy niszczenia – chemia – praca elastyczna

Mechanizm	Chemia	Praca elastyczna
Korozja naprężeniowa w LP	nadmierna zawartość składników korozyjnych w parze, zmiany wilgotności pary, naprężenia, osadzanie produktów korozji	korozja postojowa – wżery podczas niezabezpieczonych postojów akcelerują SCC, zmiany parametrów fiz.-chem.
Wysokocyklowe zmęczenie korozyjne w LP	nadmierna zawartość składników korozyjnych w parze w kombinacji ze zmiennymi naprężeniami	korozja postojowa – wżery podczas niezabezpieczonych postojów akcelerują CF, przejście przez obroty krytyczne – drgania
Niskocyklowe zmęczenie korozyjne	obecność osadów, głównie NaOH	korozja postojowa – wżery podczas niezabezpieczonych postojów, zmiany poziomu naprężeń
Korozja wżerowa	obecność soli i kwaśnych składników korozyjnych, niezabezpieczone postoje, obszary SCC, CF	obecność agresywnych soli w trakcie postoju
Osady w części HP	związki miedzi na powierzchni HP, ograniczenie przelotu, spadek sprawności	zintensyfikowany transport miedzi w okresach uruchomień po postojach
Zakrzemianie	obecność Si w parze, odkładanie Si w układzie przepływowym, spadek sprawności	uruchomienia, intensywna regulacja, zmiany parametrów fiz.-chem.
Erozja HP/IP	złuszczenie tlenków z SH i RH	zmiany wydajności, zmiany naprężeń, zmiany temperatur

Wachlarz mechanizmów niszczenia elementów w obszarze kotła i turbiny jest bardzo szeroki. Do rzadkości należą takie, na które wpływ mają pojedyncze czynniki. Większością rządzą zespoły czynników, tak o charakterze fizycznym jak i chemicznym. W warunkach pracy elastycznej dochodzą dodatkowe czynniki związane z cykliczną zmianą parametrów wrażliwych. W tabelach 2 i 3 zamieszczono syntetyczne zestawienie obejmujące wpływ pracy elastycznej i czynników chemicznych na wybrane mechaniczne niszczenia.

Podsumowanie

Elastyczne warunki pracy urządzeń zmieniają fizykochemiczne warunki pracy obiegów. Dotrzymanie parametrów czynnika wymaga zwykle optymalizacji systemów korekcji i może się wiązać również z koniecznością modernizacji układów dozowania korygentów. Zmiana w zakresie dominujących mechanizmów niszczenia może mieć wymiar statystyczny, ale również jakościowy, z pojawieniem się nowych, niewystępujących wcześniej.

Identyfikacja mechanizmów niszczenia na drodze prostej, typowej kontroli eksploatacji nigdy nie była sprawą prostą. Bardzo duża ilość mechanizmów dająca podobne, nieselektywne objawy utrudnia określenie właściwej i szybkiej odpowiedzi dotyczącej przyczyny uszkodzenia. Dużym utrudnieniem staje się ograniczony zakres kontroli parametrów fizykochemicznych prowadzonej w trakcie pracy, a zwłaszcza w trakcie wielokrotnie częstszych niż pierwotnie uruchomień. Biorąc pod uwagę ich ilość koordynacja w zakresie potrzeb pomiarowych w danym czasie wydaje się kluczowa. Druga natura człowieka – przyzwyczajenia – nie zawsze dobrze współgra z potrzebami wynikającymi ze zmiany trybu pracy urządzeń energetycznych.

Biorąc pod uwagę dynamikę zmian parametrów przy pracy elastycznej, tylko systemowe przetwarzanie informacji w taki sposób, aby w dowolnym momencie eksploatacji można było urządzeniu (elementowi) przypisać konkretny stan techniczny i prognozę eksploatacji może dać wymierne efekty.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Cycling, Startup, Shutdown, and Layup Fossil Plant Cycle Chemistry Guidelines for Operators and Chemists, Electric Power Research Institute, 1998.
- [2] Gawron P., Danisz S., *Od badań diagnostycznych i analizy warunków pracy urządzeń do systemowego monitorowania ich trwałości – doświadczenia w funkcjonowaniu LM System Pro+@.*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Udział chemii energetycznej we wzroście efektywności urządzeń”, Ustroń 2012.
- [3] Brad Burns, Doug Hubbard, *The Role of Human Performance Science in Cycle Chemistry Improvement – Is This the Missing Link?*, „PPCHEM” 1/2021, Fossil Cycle Chemistry.
- [4] Guidelines for Control of Flow-Accelerated Corrosion in Fossil and Combined Cycle Plants, Electric Power Research Institute, 1998.
- [5] Trzeszczyński J., *Diagnostyka wspierająca bezpieczeństwo i dyspozycyjność bloków klasy 200 MW podczas kontynuowania ich eksploatacji*, „Dozór Techniczny” 2023, nr 2.
- [6] Application of Film Forming Substances in Fossil, Combined Cycle, and Biomass Power Plants, International Association for the Properties of Water and Steam, 2019.

Kolejny, piąty tom Biuletynów Pro Novum prezentuje się imponująco. Znaczna część artykułów, jest przykładem harmonijnej integracji klasycznej wiedzy i doświadczeń oraz najnowszych metod analizy danych, modelowania konstrukcji oraz procesów i najnowszych technologii informatycznych.

Znaczną część naszych artykułów poświęciliśmy prezentacji *Metody Pro Novum* poprawy elastyczności bloków klasy 200 MW, która nie tylko okazała się skuteczna, ale dała nam pierwsze miejsce w konkursie.

Nasze Biuletyny uzupełnialiśmy komentarzami zawierającymi m.in. prognozy dotyczące transformacji europejskiej i polskiej energetyki. W większości okazały się trafne. Nie wszystkie jeszcze się spełniły, wiele jednak wskazuje na to, że tak się stanie.

