



Energetyka

75 lat

PROBLEMY ENERGETYKI I GOSPODARKI PALIWOWO-ENERGETYCZNEJ

12/2022

ISSN 0013-7294

CENA 30 Zł (w tym 8% VAT)

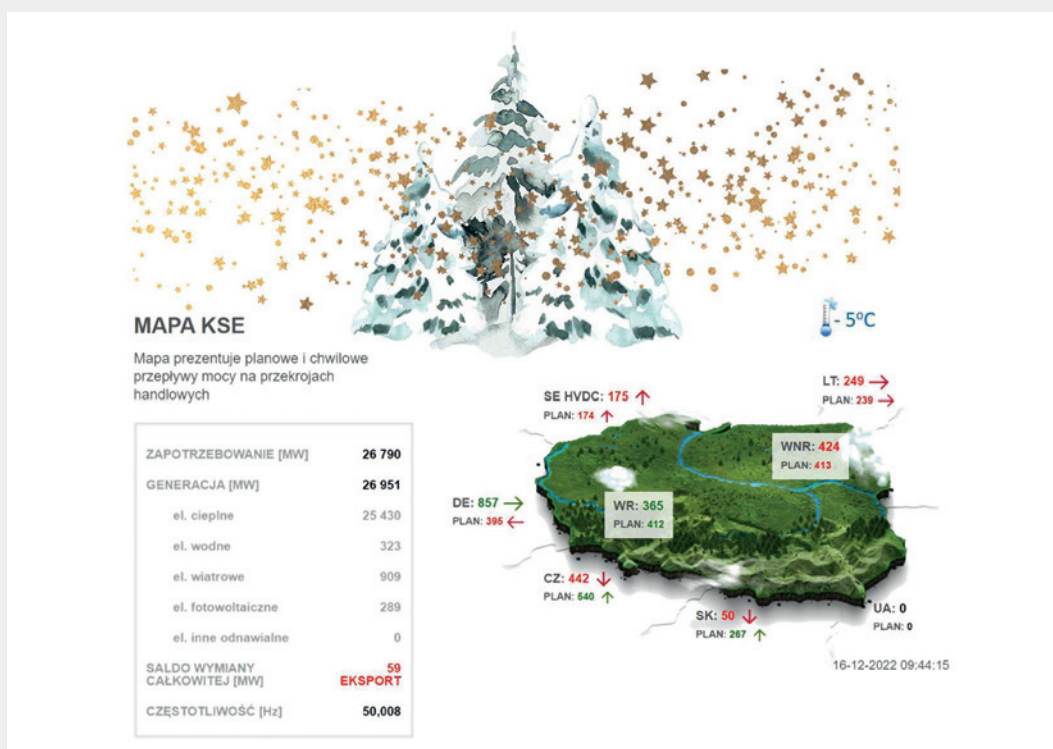
(822)



*Wesołych Świąt Bożego Narodzenia
i Szczęśliwego Nowego Roku*

Szanowni Państwo,

Gdy powstaje ten tekst za oknem pada śnieg, temperatura wynosi ok. -5°C . Typowy polski zimowy dzień. Generacja energii elektrycznej nieznacznie przekracza zapotrzebowanie. Źródła wiatrowe i fotowoltaiczne mają w niej mniej niż 5-procentowy udział.



Jak dotąd nasz system elektroenergetyczny pracuje stabilnie. Bardziej zaawansowane od nas, w realizacji polityki klimatycznej, państwa Europy Zachodniej notują problemy. W prasie m.in. czytamy, że „Słaby wiatr na północnym zachodzie kontynentu i ciągnące się od miesięcy problemy francuskich elektrowni jądrowych były największymi problemami europejskiej energetyki podczas pierwszej fali ochłodzenia [...] Francja, tradycyjnie największy eksporter energii elektrycznej w Europie, dołączyła do grona importerów netto. Została zmuszona do ograniczenia eksportu energii do Wielkiej Brytanii, która kolejny raz w ostatnich miesiącach ocierająca się o blackout została zmuszona do włączenia dwóch „awaryjnych” bloków węglowych. Ceny energii w tym czasie poszybowały do niespotykanego dotąd poziomu 2,5 tys. funtów za 1 MWh. Pani Ursula von der Leyen uspokaja, że „dzięki planowi REPowerEU i mobilizacji 300 mld euro będziemy tej zimy bezpieczni”.

Możliwe jednak, że „bezpieczeństwo” energetyczne zapewni sobie Europa w nietypowy sposób. Wprawdzie rurociągowo dostawy gazu z Rosji niemal całkowicie zostały wstrzymane, ale Federacja Rosyjska szerokim strumieniem dostarcza skroplony surowiec. O ile od stycznia do października 2021 roku UE kupiła od Rosjan ok. 12,5 mld metrów sześciennych paliwa w tej postaci, o tyle w tym samym okresie 2022 roku było to już 17,8 mld. Za szczęśliwe należy także uznać dostawy paliwa jądrowego z Federacji Rosyjskiej do Francji, mimo obowiązującego embarga. Informacje jw. i wiele innych, powszechnie dostępnych, mogłyby wskazywać na potrzebę refleksji i weryfikacji polityki energetycznej EU, przynajmniej w zakresie, w jakim ma być poddana jej polityka w stosunku do Rosji. Słyszemy jednak, że najlepszą odpowiedzią na te i inne problemy jest... przyspieszenie transformacji.

Wyniki dwóch ostatnich szczytów klimatycznych w Glasgow oraz Szarm el-Szejk pokazują, że polityka klimatyczna to projekt wyłącznie Unii Europejskiej, bez większych szans na osiągnięcie celów klimatycznych, natomiast z rosnącym prawdopodobieństwem porażki gospodarczej i społecznej, zwłaszcza w Polsce, gdzie energetyka oparta jest w przeważającym stopniu na węglu kamiennym i brunatnym. Jej transformacja w kierunku wyznaczonym przez UE wymaga olbrzymich nakładów w czasie znacznie dłuższym niż chcieliby tego twórcy strategii Fit for 55, a zwłaszcza jej jeszcze bardziej ambitnych wersji.

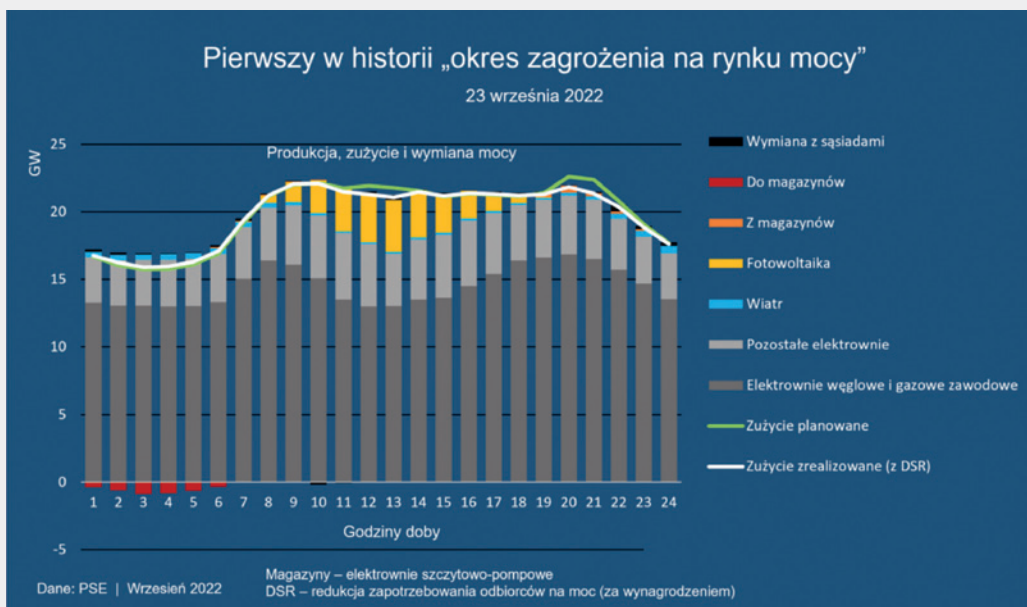
Niestety wiele z tych działań, a właściwie deklaracji, opiera się na greenwashingu, w wolnym tłumaczeniu, hipokryzji. Można się coraz częściej spotkać z opinią, że ci, którzy potrafią obchodzić klimatyczne restrykcje zyskują więcej od tych, którzy je stosują. Dotyczy to także procedur ESG. Czy UE może wygrać jednak tę batalię? Jednym z pomysłów ma być „zielona opłata graniczna” (CBAM), która ma spełnić dwa cele: wzmocnienie unijnego przemysłu i dalsze zaostrenie polityki klimatycznej. Opłaty mają obciążyć import do UE: żelaza i stali, aluminium, nawozów, cementu i prądu, a także wodoru oraz niektóre produkty przetworzone, w tym... śruby. Czy to się uda, czy raczej zainicjuje wojny handlowe? Od 1 stycznia USA rozpoczną subsydiować swoje firmy kwotą 367 mld dol., żeby... dokonać zielonego gospodarczego skoku. Podobnej protekcyjnej reakcji można oczekiwać od Niemiec i Francji. To nie dziwi, jak również to, że rzeczywistym źródłem emisji CO₂ jest nasza cywilizacja. 8 mld ludzi pragnie uzyskać standard życia taki jak w najbardziej rozwiniętych gospodarczo krajach Zachodu, w możliwie najkrótszym czasie.

Jednocześnie można zauważyć, że batalia UE o klimat przybiera coraz bardziej radykalne formy. Część, szczególnie młodych osób, zdeglustowanych tempem wdrażania klimatycznych zmian oraz poziomem greenwashingu radykalizuje się tworząc organizacje, takie jak Just Stop Oil czy Letzte Generation (Ostatnie pokolenie). Ci ostatni są najbardziej konsekwentni, oprócz spektakularnych protestów zmieniają bowiem swój styl życia: tworzą wspólnoty mieszkaniowe w wynajętych lokalach. Utrzymują się z internetowych zbiorów pieniężnych. W żywność zaopatrują się nierzadko w kontenerach z odpadami wielkich sieci spożywczych. Ich postępowanie jest szczególnie groźne, bo jest w kontrze do systemu ekonomicznego. W świecie rządzą neoliberalne standardy. Kondycje państw wyznacza poziom i tempo wzrostu PKB.

Krótki opis aktualnej sytuacji pokazuje, niestety tylko w części, jak wielkim wyzwaniem dla polskiej elektroenergetyki jest kontynuowanie jej transformacji. Polityka klimatyczna UE to nie jedyny problem. Źródłem wielu problemów jest nasz specyficzny w Europie miks energetyczny oraz nie do końca przemyślane działania w trakcie transformacji energetycznej w okresie ostatnich ok. czterdziestu lat, w tym zaniechanie budowy elektrowni jądrowej w Żarnowcu.

Zanim powstaną pierwsze bloki atomowej elektrowni minie ok. 15 lat, zanim powstaną pierwsze morskie farmy wiatrowe minie ca 10 lat. Za ok. 15-20 lat wyczerpią się eksploatowane aktualnie odkrywki węgla brunatnego. Nowe elektrownie na węgiel kamienny już nie powstaną. W tym czasie znacznie wzrośnie zapotrzebowanie na energię elektryczną. Okazuje się, że postęp, który miał redukować zużycie energii, w rzeczywistości ją wzmacnia, w rosnącym tempie. W tzw. okresie przejściowym zielonej transformacji planowaliśmy, chyba jeszcze nadal planujemy, wybudowanie parędziesięciu bloków gazowych i gazowo-parowych. Jak informuje najnowszy raport McKisneya konkurencyjność gospodarki naszego Zachodniego Sąsiada i nie tylko jego, będzie zależna od dostępu do gazu i jego ceny. Realna transformacja tam także nie nadąza za celami sformułowanymi w rządowych planach, m.in. w zakresie rozwoju sieci energetycznych. Problem stanowi bezpieczeństwo dostaw gazu ziemnego, co zmusza władze do większego niż planowano wykorzystania stabilnych źródeł węglowych.

W Polsce, jak informowała prasa, dzięki „poderwaniu” do eksploatacji długo eksploatowanego bloku energetycznego oraz systemowi DSR przetrwaliśmy, zupełnie przeciętne w dniu 23 września br., zapotrzebowanie odbiorców. Okazało się, że PSE rzeczywiście mogą liczyć na redukcję zapotrzebowania u odbiorców. Tyle, że sam DSR nie wystarczy.



Problemowi bezpieczeństwa energetycznego w okresie dalszej transformacji naszej elektroenergetyki poświęciliśmy nasze kolejne Sympozjum, z którego relację prezentujemy w końcowej części Biuletynu. W Biuletynie prezentujemy artykuły na podstawie wybranych referatów.

Sympozjum otworzyła debata, której uczestnicy byli zgodni co do tego, że bloki węglowe, zwłaszcza klasy 200 MW, powinny przedłużyć swoją pracę do ok. 2035 roku, bo dla takiego działania nie mamy realistycznej alternatywy. Warunkiem jest jednak opracowanie dla nich strategii technicznej, która zagwarantuje bezpieczeństwo i dyspozycyjność. Wyzwaniem jest nie tylko czas eksploatacji, ale zwłaszcza jej warunki, tym bardziej że od dawna są eksploatowane w trybie regulacyjnym, a ich stan techniczny jest oceniany najczęściej jak dla urządzeń eksploatowanych w trybie podstawowym. Założeniem do takiej strategii eksploatacji nadaliśmy formę Projekt BLOKI 2025+, a wybrane z niego zagadnienia prezentujemy w artykule otwierającym Biuletyn.

W Biuletynie Pro Novum zamieściliśmy także artykuł prezentujący koncepcję oraz główne komponenty Metody Pro Novum poprawy elastyczności oraz zapewnienia bezpieczeństwa w okresie dalszej eksploatacji bloków klasy 200 MW. Metoda Pro Novum to rezultat zakończonego sukcesem naszego udziału w Programie Bloki 200+. Warto zwrócić także uwagę na artykuły, które prezentują korzyści, jakie można uzyskać integrując najlepszą klasyczną wiedzę i doświadczenie z obszaru diagnostyki implementując ją w systemach zdalnego nadzoru diagnostycznego kotłów, rurociągów oraz turbozespołów. To działanie realizujemy z naszymi Partnerami Technologicznymi, z którymi wieloletnią współpracę zamierzamy przekształcić w tryb LTSA, co jest jednym z warunków zachowania kompetencji niezbędnych do zapewnienia bezpieczeństwa i dyspozycyjności urządzeń oraz komfortu współpracy z ich użytkownikami.

Szanowni Państwo, gdy kończymy redagować ten Biuletyn, śnieg nie tylko przestał padać, ale całkowicie zniknął. Świeci słońce, temperatura na zewnątrz wynosi 9°C. W prasie* czytamy, że w pierwszych m-cach przyszłego roku Bruksela zamierza zreformować rynek energii, a wszystkie podjęte inicjatywy mają być zgodne z polityką zielonej transformacji. Parę dni temu Komisja Europejska zatwierdziła program wsparcia w wysokości 28 mld EUR dla energii odnawialnej w Niemczech, które chcą mieć 80 proc. energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych do 2030 roku. Zakłada on wypłatę premii producentom energii odnawialnej ponad cenę rynkową, którą otrzymają za jej sprzedaż. Co to oznacza, nie tylko dla transformacji energetyki w Polsce? Chciałoby się takie działania potraktować jako źródło inspiracji. Czy jest to jednak realistyczne oczekiwanie?

Mając nadzieję na umożliwienie wszystkim Czytelnikom Biuletynu przyjemnej lektury i refleksji nie tylko z zaanonsowanych przez nas artykułów, życzymy Państwu w Nowym 2023 roku pomyślności, zwłaszcza w pokonywaniu trudności, których dzisiaj nie sposób przewidzieć.

Jerzy Trzeszczyński & Jerzy Dobosiewicz

Projekt BLOKI 2025+ Założenia do strategii kontynuowania eksploatacji bloków klasy 200 MW

Wybrane zagadnienia

Project Power Units 2025+ Assumptions for the strategy for continuing the operation of 200 MW class power units

Selected issues

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 zwiększenia 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.

Słowa kluczowe: Projekt BLOKI 2025+, bloki klasy 200 MW, strategia eksploatacji

Continuation of the operation of 200 MW class power 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 renewable sources, which will be 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 around 2035, as well as financing these units, after the introduction of ETS 550 fees and the expiry of support from the Capacity Market.

Keywords: Project Power Units 2025+, 200 MW class power units, operation strategy

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.

Przedmiot Projektu

Bloki klasy 200 MW z możliwością wykorzystania niektórych komponentów Projektu na blokach/głównych urządzeniach ciepłno-mechanicznych, eksploatowanych przy takich samych lub podobnych parametrach pracy i wykonanych z zastosowaniem takich samych/podobnych materiałów oraz technologii.

Cel Projektu

Zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego Polski oraz akceptowalnych dla gospodarki i odbiorców indywidualnych cen energii elektrycznej i ciepła podczas transformacji polskiej elektroenergetyki w okresie do 2035–2040 roku.

Zapewnienie zrównoważonego rozwoju kraju podczas transformacji polskiej elektroenergetyki w okresie jw.

Podstawa założeń do strategii kontynuowania eksploatacji bloków 200 MW

Podstawę do opracowania założeń strategii przedłużenia eksploatacji bloków 200 MW stanowi wiedza oraz 35-letnie doświadczenie *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 kotłowni (walczaki), głównych rurociągów parowych (kolan) oraz wirników, kadłubów i komór zaworowych turbin po przekroczeniu 250 000 godzin pracy.

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 posiadanej zapasu trwałości.

Wyniki monitorowania bieżącego stanu technicznego urządzeń ciepłno-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 bywają znacznie wyższe od wartości uznawanych (np. w instrukcjach) za akceptowalne,
- 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).

Metoda Pro Novum poprawy elastyczności bloków 200 MW pokazała, 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 elastycznej, 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.

Transformacja polskiej elektroenergetyki – ocena aktualnej sytuacji i próba prognozy

Transformacja polskiej energetyki trwa odkąd ona istnieje. Określenie „transformacja” w połączeniu z polityką klimatyczną UE jest używane i nadużywane od czasu przystąpienia Polski do Unii Europejskiej. Wiele faktów, w tym wyniki ostatniego szczytu

w Szarm el-Szejk pokazują kolejny raz, że jest to wyłącznie projekt Unii Europejskiej, bez szans na zrealizowanie celu klimatycznego w dającej się przewidzieć przyszłości, natomiast z rosnącym prawdopodobieństwem porażki gospodarczej i społecznej, zwłaszcza w Polsce, której energetyka nadal w b. dużym stopniu, oparta na własnych zasobach węgla kamiennego i brunatnego, wymaga olbrzymich nakładów oraz czasu, znacznie dłuższego niż chcieliby to twórcy strategii *Fit for 55*. Powrót do generacji z węgla jest wyraźnie widoczny nawet w państwach Unii Europejskiej, także w tych z nich, w których ma ona marginalne znaczenie, np. we Francji. Dla Polski takie podejście nie ma alternatywy, nie tylko w okresie paru najbliższych lat.

Polityka energetyczna UE promuje technologie, które – jak np. wodór czy magazyny energii – są w fazie przedkomercyjnej. Nie da się aktualnie, racjonalnie określić optymalnego miks energetycznego, a także czasu i kosztów jego realizacji oraz cen energii po jego zrealizowaniu. Mimo że wojna w Ukrainie odstąpiła wszystkie słabości tej polityki, zamiast ją zweryfikować i zmodyfikować ogłasza się jej ... przyspieszenie. Widać wyraźnie, że jednym z głównych celów Polityki Klimatycznej jest tzw. okres przejściowy na gazie ziemnym. Ten model energetyki jest niezwykle korzystny dla dostawców surowców, integratorów dostaw, właścicieli rurociągów przesyłowych oraz dostawców technologii generacji energii elektrycznej i ciepłej. Dla ich odbiorców to jednak bardzo drogi model energetyki. Wojna w Ukrainie pokazała, że mający niewiele wspólnego z bezpieczeństwem energetycznym. Kolejne limity CO₂ mają znaczenie dla dostawców nowych technologii, są jednak bez większego znaczenia dla „ratowania” klimatu. Najwięksi emitenci CO₂ skierują się w kierunku OZE, gdy powstaną dojrzałe technologie, a koszty generacji zapewnią konkurencyjność ich gospodarek.

Specyficzne, własne problemy z transformacją polskiego sektora elektroenergetycznego:

- pozbycie się własnych dostawców głównych urządzeń energetycznych,
- likwidacja części kopalń węgla kamiennego,
- brak nowych odkrywek węgla brunatnego,
- postępująca redukcja możliwości i kompetencji w zakresie utrzymania stanu technicznego,

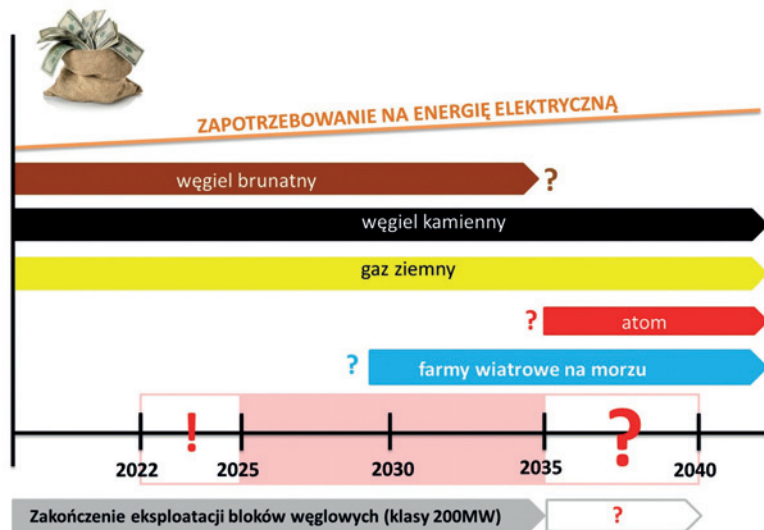
oraz wyżej opisana polityka energetycznego UE sprawiły, że polska energetyka znalazła się w bardzo trudnym położeniu. Po 2025 roku bloki 200 MW mogą utracić nie tylko wsparcie na Rynku Mocy, ale także od strony kompetencji technicznych. Te ostatnie wyczerpują się znacznie szybciej niż wyczerpaniu ulega trwałość urządzeń.

Rysunek 1 ilustruje, w pewnym uproszczeniu, sytuację polskiej elektroenergetyki w latach 2025 – 2035/2040. To mogą być trudne lata, zwłaszcza gdy w najbliższym czasie nie zostaną podjęte odpowiednie decyzje i stosowne działania.

Gaz nadal będzie towarzyszył transformacji polskiej energetyki, natomiast nie będzie można zbudować na nim tylu mocy wytwórczych, by w okresie przejściowym zastąpić węgiel.

Projekt atomowy to dopiero początek bardzo trudnej realizacji i kosztownej drogi. Za 3-4 lata będzie można powiedzieć czy ok. 2035 roku będzie mógł być częścią miks energetycznego.

OZE – zwłaszcza morskie farmy wiatrowe mogą istotnie zasilić system energetyczny ok. 2030 roku.



Rys. 1.

Wykorzystanie energetyki opartej na węglu, zwłaszcza kamiennym, to scenariusz dla Polski wyjątkowo atrakcyjny. Tym bardziej że elektrownie węglowe są coraz mniej uciążliwe dla środowiska, a bloki, szczególnie klasy 200 MW, ze względu na swoją liczbę oraz możliwości techniczne mogą stabilizować system, który złożony z atomu i OZE będzie tego wymagał.

Wydaje się, że zaradzić temu można tylko w jeden sposób. Zachować w eksploatacji bloki 200 MW. Stworzyć warunki do przedłużenia 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, przesunąć 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 strategii

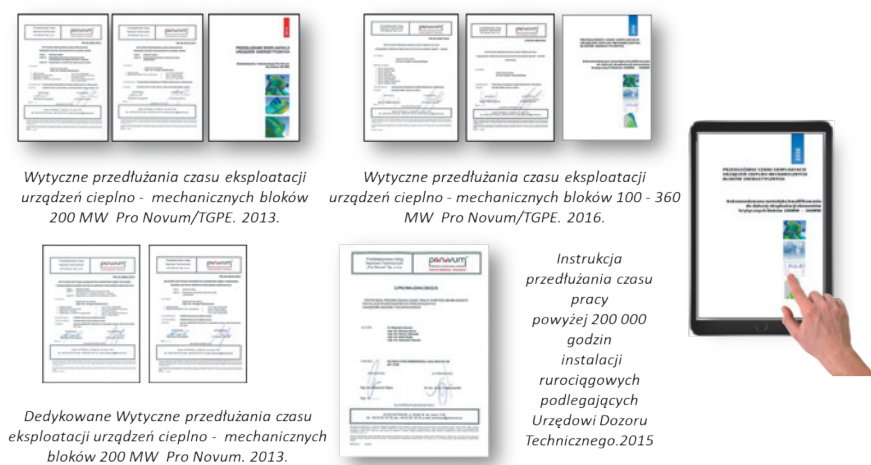
- Dalszą eksploatację bloków węglowych powiązać ściśle z tempem wdrażania OZE.
- Bloki węglowe, zwłaszcza klasy 200 MW, powinny być eksploatowane do ok. 2035 roku, z możliwością przedłużenia pracy do 2040 roku. W latach 2030 i 2035 należy ten scenariusz zweryfikować.
- Utrzymanie stanu technicznego (remonty i diagnostyka) w okresie jw. powinno zapewnić ich bezpieczną eksploatację oraz oczekiwaną dyspozycyjność.
- Wszystkie bloki należy przystosować do przedłużenia ich eksploatacji, części blokom można zapewnić:
 - poprawę elastyczności, zwłaszcza obniżenie minimum technicznego,
 - obniżenie emisji CO₂
 do technicznie i ekonomicznie uzasadnionych poziomów.
- Stan techniczny bloków utrzymywać w formule LTSA, co zapewni wymagany poziom utrzymania technicznego zwłaszcza poprzez zapewnienie koniecznego poziomu kompetencji technicznych personelu firm remontowych i diagnostycznych.

Podsumowanie

1. Przeprowadzić konsultacje ze specjalistami utrzymania majątku z elektrowni wyposażonych w bloki 200 MW.
2. Opracować ostateczną wersję **Projektu BLOKI 2025+**.
3. Zainicjować realizację Projektu.

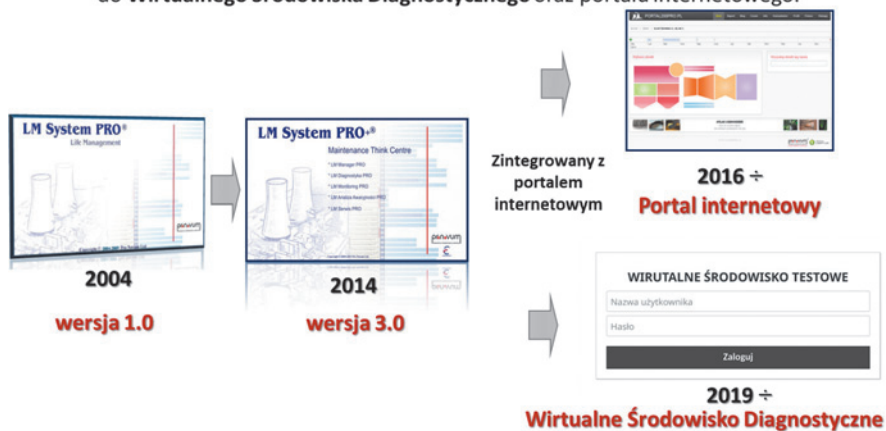
Podstawy strategii technicznej Projektu:

- diagnostyka:
 - należy zaktualizować „Wytyczne przedłużania urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 200 MW” opracowane w 2013 roku przez *Pro Novum* z udziałem specjalistów ze wszystkich elektrowni polskich wyposażonych w bloki 100 MW – 400 MW, rys. 2,
 - wdrożyć systemy diagnostyczne, adekwatne do trybu pracy bloków, które od wielu lat eksploatowane są regulacyjnie (z rosnącą intensywnością),
 - powrócić do systemu 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;
- przedłużanie eksploatacji:
 - wydłużenie eksploatacji (z poprawą elastyczności) poprzedzić technicznym audytem bloków oraz remontem o charakterze profilaktycznym/modernizacyjnym,
 - oprócz wymiany elementów o wyczerpanej trwałości stosować sprawdzone technologie rewitalizacji oraz regeneracji,
 - przywrócić klasyczne remonty kapitalne o charakterze zapobiegawczym,
 - prowadzić profesjonalną analizę awaryjności;
- poprawa elastyczności:
 - uelastyczyć bloki w zakresie zgodnym z oczekiwaniami Operatora – wykorzystać rozwiązania opracowane podczas Programu Bloki 200+, (*Metoda Pro Novum* poprawy elastyczności bloków klasy 200 MW została opracowana i zweryfikowana podczas Programu Bloki 200+),
 - wyposażyć bloki w systemy diagnostyczne zorientowane na zapewnienie bezpieczeństwa w regulacyjnym trybie pracy z możliwością sprawowania diagnostyki w zdalnym trybie, rys. 3;
- serwisy LTSA – bloki utrzymywać w trybie Long Time Service Agreement oraz LTDSA (Long Time Diagnostic Service Agreement).



Rys. 2.

Od programu Diagnostyka PRO poprzez platformę informatyczną LM System PRO® do Wirtualnego Środowiska Diagnostycznego oraz portalu internetowego.



Rys. 3.

Wiedza i 35-letnie doświadczenie Firmy Pro Novum w zakresie bloków klasy 200 MW mogą zostać wykorzystane dla szybkiego rozpoczęcia prac oraz wyboru najkorzystniejszych rozwiązań. Do Projektu 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.



- Kontynuowanie eksploatacji bloków 200 MW należy traktować jako ostatni etap ich eksploatacji.
- Ten czas powinien zostać dobrze wykorzystany dla stworzenia najbardziej korzystnego dla Polski nowego modelu sektora elektroenergetycznego.
- Dalszą eksploatację bloków węglowych, w tym zwłaszcza klasy 200 MW, czeka szereg zagrożeń. Aby ich uniknąć, a przynajmniej zminimalizować należy jak najszybciej przystąpić do opracowania i wdrożenia strategii ich eksploatacji, w tym zwłaszcza utrzymania stanu technicznego adekwatnego do dających się przewidzieć wyzwań, jakie stoją przed nimi.
- Uwzględniając skalę przebudowy polskiej energetyki należy konserwatywnie podchodzić do terminów uruchamiania nowych źródeł generacji energii, zwłaszcza z atomu i morskich farm wiatrowych, a także do długookresowych korzyści z tego rodzaju transformacji.
- Bloki wycofywane z eksploatacji powinny, przez pewien czas, posiadać status strategicznej rezerwy, tj. być w gotowości do „awaryjnego” ich uruchamiania. To jeszcze jeden z kosztów energetycznej transformacji, który należy uwzględnić.

Wykorzystanie zapasów trwałości oraz rezerw po stronie sterowania dla zwiększenia elastyczności bloków klasy 200 MW

Improving the flexibility of 200 MW class units by using capabilities and reserves of the control-side as well as remaining life

Zdobyta wiedza i doświadczenie skłoniły *Pro Novum* do opracowania *Metody*, której podstawowymi atutami są uniwersalność i niskie koszty wdrożenia, co sprawia, że może zostać zaimplementowana z korzyścią ekonomiczną nawet na blokach, których dalsza eksploatacja może być względnie krótka z uwagi na niespełnienie wszystkich wymagań emisyjnych oraz braku korzyści z Rynku Mocy, a także wykonywania specjalnych usług systemowych. W artykule przedstawiono genezę, podstawowe założenia, warunki wdrożenia, opis funkcjonalny oraz atuty *Metody Pro Novum*.

Słowa kluczowe: *Metoda Pro Novum*, bloki klasy 200 MW, uniwersalność, niskie koszty wdrożenia *Metody*

The acquired knowledge and experience moved *Pro Novum* to develop a *Method*, the main advantages of which are universality and low implementation costs, which means that it can be implemented with an economic benefit even on units whose further operation may be relatively short due to failure to meet all emission requirements and no benefits from the Power Market as well as special system services. The article presents the genesis, basic assumptions, implementation conditions, functional description and advantages of the *Pro Novum Method*.

Keywords: *Pro Novum Method*, 200 MW class power units, universality, low implementation cost

Wstęp

Wiedza oraz zdobyte 35-letnie doświadczenie przyczyniło się do opracowania *Metody Pro Novum*, dzięki której wykazano poprawę elastyczności bloku referencyjnego nr 1 w *Enea Elektrownia Połaniec*. Przy użyciu specjalistycznego oprogramowania, niskich kosztach wdrożenia oraz uniwersalności *Metody* może ona wspierać bezpieczeństwo i dyspozycyjność bloków klasy 200 MW. W artykule przedstawiono genezę, podstawowe założenia, warunki wdrożenia, opis funkcjonalny oraz atuty *Metody Pro Novum*.

Geneza *Metody Pro Novum*

Źródłem *Metody Pro Novum* jest wiedza oraz 35-letnie doświadczenie zdobyte podczas:

- badań diagnostycznych 42 bloków klasy 200 MW [1, 2],
- monitorowania stanu technicznego 26 bloków 200 MW [3, 4],
- współpracy ze specjalistami wszystkich użytkowników bloków klasy 200 MW przy opracowaniu „Wytycznych przedłużania eksploatacji bloków jw. do 350 000 godzin” [5-7],
- rewitalizacji stalowych elementów 23 turbin klasy 13K215 [8],
- badań niszczących krytycznych elementów kotłów (walczaki), głównych rurociągów parowych (kolan) oraz wirników, kadłubów i komór zaworowych turbin po przekroczeniu 250 000 godzin pracy [9].

Nasza 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, nawet jeśli warunki pracy ulegną zmianie w odpowiedniej relacji do posiadanego zapasu trwałości [4].

Wyniki monitorowania warunków eksploatacji i bieżącego stanu technicznego urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 200 MW dowiodły, 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 temperatury i poziomy naprężeń bywają znacznie wyższe od wartości uznawanych (np. w instrukcjach) za akceptowalne;
- 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 (nie tylko bloków 200 MW).

Metoda Pro Novum – założenia

Metoda Pro Novum pozwala zwiększyć elastyczność bloków klasy 200 MW poprzez uniwersalność metody i niskie koszty wdrożenia, co sprawia, że może zostać zaimplementowana z korzyścią ekonomiczną nawet na blokach, których dalsza eksploatacja okaże się względnie krótka ze względu na niespełnienie wymagań emisyjnych według konkluzji BAT, jak również bez znaczących profitów z Rynku Mocy. Istota *Metody* została przedstawiona na rysunku 1.

W celu potwierdzenia zapasów/rezerw po stronie trwałości i sterowania zaprojektowano narzędzia dla:

- ich identyfikacji,
- weryfikacji, z wykorzystaniem modelowania i symulacji procesów, analizy stanów termicznych, naprężeń i utraty trwałości,
- oceny stanu technicznego i prognozowania trwałości do jej całkowitego wyczerpania na skutek:
 - zmęczenia,
 - pęcznienia,z uwzględnieniem pracy warunkowej na podstawie metod i kryteriów mechaniki pęknięcia [2, 3],
- bieżącego monitorowania:
 - stanów termicznych i naprężeniowych w wybranych elementach krytycznych kotła, głównych rurociągów parowych oraz turbiny,
 - emisji podstawowych zanieczyszczeń w spalinach w kontekście intensywności regulacji,
 - efektywności wytwarzania energii z wykorzystaniem pomiaru w trybie on-line Wskaźnika Jednostkowego Zużycia Energii Chemicznej Paliwa,
- optymalizacji pracy pompy wody chłodzącej z uwzględnieniem pracy regulacyjnej.

Warunki wdrożenia Metody Pro Novum

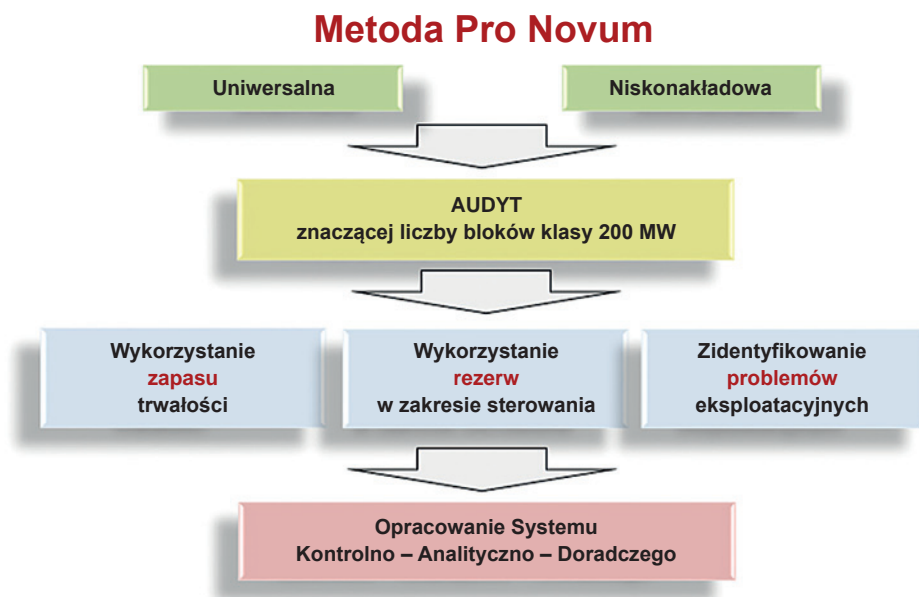
Wdrożenie *Metody Pro Novum* może przebiegać na bloku referencyjnym, który:

- w przeszłości został zmodernizowany w niewielkim zakresie,
- w okresie wdrażania podlegał będzie wyłącznie typowym, wcześniej zaplanowanym remontom bieżącym,
- plany produkcyjne zachowa bez zmian, z wyjątkiem okresów testów i optymalizacji po zmianach w systemie sterowania oraz podczas Pomiaru I i Pomiaru II (według wymagań NCBiR),
- Instrukcje Eksploatacji zachowa z możliwie najmniejszą liczbą zmian,
- poza instalacją czujników dla dodatkowych pomiarów temperatury metalu i czynnika (w możliwie najmniejszym zakresie) nie dozna żadnych zmian konstrukcyjnych, zarówno w obszarze urządzeń głównych jak i pomocniczych,
- nie będzie udostępniał sygnałów o charakterze obliczeniowym zaimplementowanych wcześniej na potrzeby kontroli eksploatacji i sterowania.

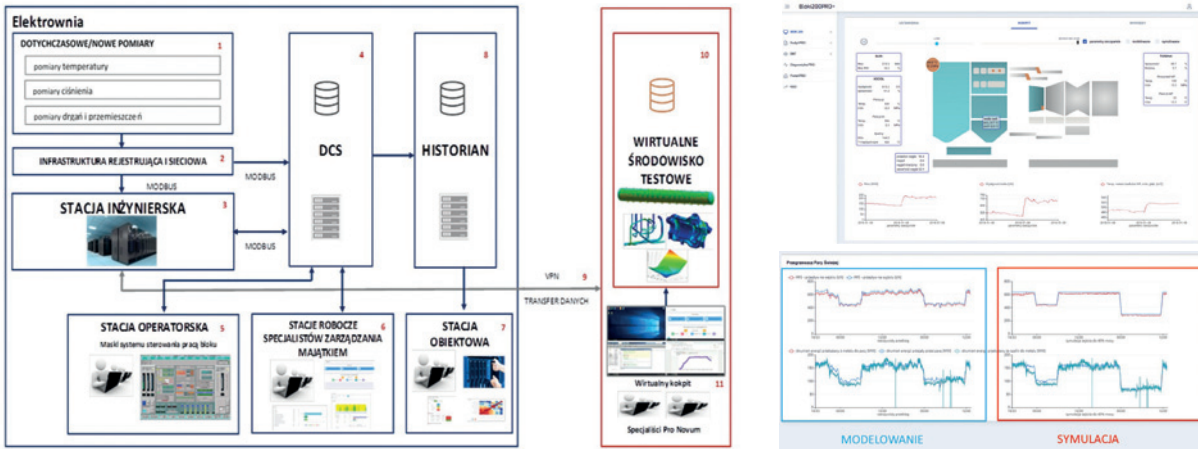
Ewentualne awarie bloku będą analizowane pod kątem ich związku z pracami realizowanymi na potrzeby *Metody*. Dotąd, w całym okresie wdrażania *Metody* na bloku referencyjnym nie zarejestrowano takiego przypadku [4, 7].

Realizacja Metody Pro Novum

Wdrożenie *Metody Pro Novum* na bloku referencyjnym wymagało wykonania poniżej wymienionych prac oraz przedsięwzięć.



Rys. 1. Istota *Metody Pro Novum* – powiększenie elastyczności bloków klasy 200 MW



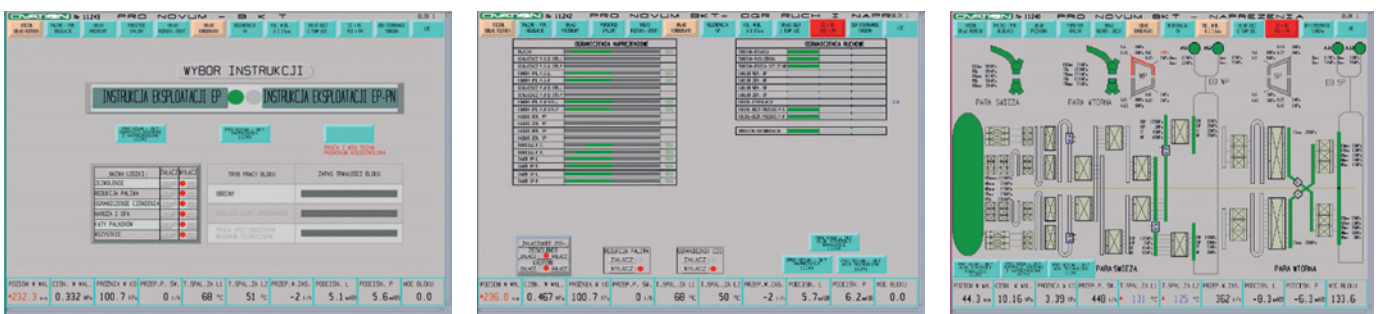
Rys. 2. Uniwersalny System Zdalnej Komunikacji pomiędzy blokiem rzeczywistym oraz Informatycznym Środowiskiem Testowym w Pro Novum

1. Audyt bloku – przez który należy rozumieć:
 - a) analizę historii i warunków pracy w okresie od ostatniego remontu kapitalnego,
 - b) inwentaryzację systemu pomiarowego,
 - c) ocenę stanu technicznego z prognozą trwałości na podstawie retrospekcji i własnych badań diagnostycznych,
 - d) analizę Instrukcji Eksploatacji,
 - e) analizę systemu sterowania, w tym przypadku Systemu Ovation w wersji Solaris,
 - f) identyfikację podczas testów ograniczeń napięciowych oraz poszczególnych rodzajów ograniczeń ruchomych towarzyszących zwiększaniu prędkości naboru mocy i temperatur pary,
 - g) sposób redukcji poziomu emisji, zwłaszcza w zakresie NOx, SOx oraz pyłu,
 - h) analizę strategii eksploatacji bloku w możliwie najdłuższym horyzoncie czasowym,
 - i) opracowanie wniosków dotyczących możliwości wdrożenia *Metody* i listy problemów wymagających rozwiązania.
2. Zabudowa/uzupełnienie systemu pomiarowego wraz z podłączeniem nowych sygnałów pomiarowych do DCS bloku.
3. Badania i ocena stanu technicznego elementów krytycznych bloku.

4. Instalacja Stacji Inżynierskiej i uruchomienie komunikacji pomiędzy blokiem referencyjnym, jego DCS a Stacją Inżynierską oraz Informatycznym Środowiskiem Testowym w Pro Novum – rysunek 2.
5. Opracowanie cyfrowych bliźniaków elementów krytycznych, ich implementacja na Stacji Inżynierskiej; udostępnienie wyników obliczeń naprężeń w czasie rzeczywistym w DCS Bloku 1 Elektrowni.
6. Bieżąca obserwacja uruchomień z wykorzystaniem autorskich (*Pro Novum*) narzędzi informatycznych.
7. Symulacje przyspieszonych uruchomień/nowych warunków pracy elementów.
8. Opracowanie planu testów i zatwierdzenie ich przez specjalistów Elektrowni.
9. Testy uruchomień/pracy przy obniżonym minimum technicznych/naborów mocy.
10. Opracowanie i implementacja nowych algorytmów i masek operatorskich – rysunek 3.
11. Projekty/akceptacje nowych zapisów do Instrukcji Eksploatacji.

System składa się z dwóch głównych komponentów.

- Stacji Inżynierskiej EFSPRO połączonej z DCS bloku wykorzystywanej do archiwizacji i przetwarzania dodatkowych sygnałów pomiarowych (pkt 2) oraz implementacji Bloku



Rys. 3. Nowe maski operatorskie w systemie sterowania DCS Ovation

Kontroli Trwałości (BKT) do obliczeń naprężeń, w trybie on-line, w wybranych elementach krytycznych bloku, także do nadzorowania zapasów naprężeń i trwałości podczas pracy bloku, jak również podczas jego testów, strojenia i optymalizacji po zmianach w systemie sterowania.

- Informatycznego Środowiska Testowego (IŚT), w którym zaimplementowano Wirtualny Blok Klasy 200 MW, WBK200 – jeden z interfejsów przedstawiono na rysunku 4.

Testy potwierdzające możliwość zwiększenia elastyczności można istotnie ograniczyć korzystając z modelowania wybranych procesów eksploatacji oraz symulacji nowych warunków pracy i ich skutków na Wirtualnym Bloku Klasy 200 MW.

Platforma Informatyczna BLOKI200PRO+ integruje programy wspierające audyt bloku, komercjalizację *Metody* oraz bezpieczeństwo, dyspozycyjność i efektywność eksploatacji.

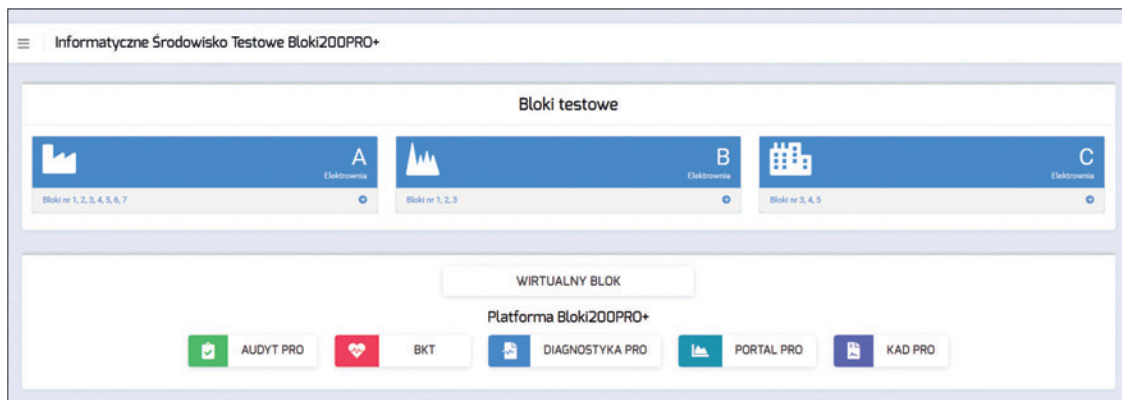
Interfejs Informatycznego Środowiska Testowego przedstawiono na rysunku 5.

Programy z Platformy BLOKI200PRO+ przeznaczone są, uogólniając, do:

- 1) wspierania wdrożenia *Metody Pro Novum* na dowolnym bloku klasy 200 MW – Program Audyt PRO;
- 2) zapewnienia bezpiecznej pracy bloku o zwiększonej elastyczności oraz w trybie jeszcze bardziej intensywnej niż dotąd pracy regulacyjnej poprzez zastąpienie Bloku Ograniczeń Termicznych (BOT) dokładniejszymi dla oceny stopnia wyczerpania trwałości, kryteriami naprężeniowymi (Blok Kontroli Trwałości, BKT);
- 3) zdalnej diagnostyki z wykorzystaniem programu Diagnostyka PRO, opartej na bieżącej analizie rzeczywistych warunków pracy; standardowe podejście wykorzystujące czas pracy i liczbę uruchomień z poszczególnych stanów ciepłych może prowadzić do nieakceptowalnych niedokładności;
- 4) nadzoru nad bezpieczną i dyspozycyjną pracą bloku eksploatowanego w intensywnej regulacji, z przyspieszonymi uruchomieniami i naborami mocy, z dużą ilością uruchomień



Rys. 4. Interfejs Wirtualnego Bloku klasy 200 MW



Rys. 5. Interfejs Informatycznego Środowiska Testowego

lub pracy bloku przy obniżonym minimum technicznym; taką funkcjonalność posiada Program Kontrolno-Analityczno-Doradczy (KAD PRO), który na bieżąco analizuje związek pomiędzy stopniem intensywności regulacji a stanem technicznym głównych urządzeń ciepłno-mechanicznych, ich dyspozycyjnością oraz efektywnością elastycznego trybu pracy bloku;

- 5) wsparcia komercjalizacji *Metody Pro Novum* (Portal PRO), ale także procesu zachowania kompetencji, których wyczerpanie może stwarzać zagrożenie dla bezpieczeństwa, również duże jak wyczerpanie trwałości [10].

Wyniki realizacji *Metody Pro Novum*

Wyniki prac badawczo-rozwojowych oraz pomiarów przez firmę niezależną udowodniły, że dzięki zastosowaniu *Metody Pro Novum* blok referencyjny:

- można uruchamiać szybciej niż w oczekiwanych przez NCBR czasach uruchomień, a nawet krócej od czasów deklarowanych przez *Pro Novum*,
- może pracować stabilnie i bezpiecznie z mocą obniżoną do 90 MW przy emisji NOx w zakresie 394–402 mg/m³,
- nabór mocy można realizować z prędkością 4% mocy osiągalnej/minutę; poprawa elastyczności bloku referencyjnego nie pogorszyła jego sprawności, a wartości jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa przez blok na drodze pomiarów i poprzez narzędzie informatyczne opracowane przez *Pro Novum* są zbieżne.

Podsumowanie

Metoda Pro Novum zwiększenia elastyczności bloków klasy 200 MW pozwala zrobić to:

- w sposób niskonakładowy.
- względnie szybko, bez potrzeby istotnej zmiany planów produkcyjnych, w tym planów remontowych.

Opracowane moduły IST oraz modele obliczeniowe są elastyczne i mogą być modyfikowane i wykorzystywane na blokach energetycznych tej samej klasy lub podobnej konstrukcji i parametrach pracy.

Metoda Pro Novum może być wdrażana w całości lub w formie implementacji wybranych komponentów w zależności od wymagań Operatora Systemu Energetycznego oraz specyficznych uwarunkowań danej elektrowni czy konkretnego bloku. Implementacja *Metody* może zostać przeprowadzona na blokach, których dalsza eksploatacja będzie względnie krótka i bez dodatkowych opłat Operatora za bardziej niż dotąd regulacyjny tryb pracy bloku. Stwarza dogodne warunki do współpracy z Urzędem Dozoru Technicznego, co powinno sprzyjać jej komercjalizacji.

Metodę Pro Novum wyposażono w narzędzia wsparcia jej komercjalizacji z możliwością wykorzystania pracy zdalnej, co uważamy za jej atut porównywalny do jej uniwersalności oraz względnie niskich kosztów wdrożenia. Możliwość przetwarzania informacji w wiedzę niezbędną do zapewnienia bezpieczeństwa i dyspozycyjności, zwłaszcza w zakresie utrzymania stanu

technicznego w skali nie tylko jednego bloku i nie tylko w jednej elektrowni sprawia, że kompetencje w tym zakresie można zachować zwłaszcza dla tych bloków, które mogą być nadal eksploatowane przez 10-15 lat.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Trzszczyński J., *Poprawa elastyczności bloków klasy 200 MW poprzez wykorzystanie możliwości i rezerw po stronie sterowania oraz zapasów trwałości*. „Energetyka” 2022, Biuletyn Pro Novum nr 2/2022.
- [2] BS 7910 – 2013+A1:2015: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
- [3] Trzszczyński J., Murzynowski W., *Nadzór diagnostyczny nad warunkową eksploatacją uszkodzonych schładzaczy do czasu ich wymiany lub naprawy*. „Energetyka” 2019, Biuletyn Pro Novum nr 1/2019.
- [4] Trzszczyński J., Hattas M., Murzynowski W., *Digitalizacja środowiska diagnostycznego jako proces wspierający bezpieczeństwo i dyspozycyjność urządzeń energetycznych*. VIII Konferencja Techniczna „Utrzymanie Ruchu – diagnostyka, remonty, modernizacje” Kazimierz Dolny, 22-23 marca 2022.
- [5] Kusibab M., Hattas M., Murzynowski W., Zając P., *Architektura cyfrowego środowiska diagnostycznego wspierającego wdrożenie Metody Pro Novum na blokach klasy 200 MW*. „Energetyka” 2022, Biuletyn Pro Novum nr 2/2022.
- [6] Stanek R., Trzszczyński J., Dąbrowski M., *Diagnostyka jednego typu urządzeń w skali KSE z wykorzystaniem portalu internetowego integrującego informacje eksploatacyjne*. „Energetyka” 2017, Biuletyn Pro Novum nr 2/2017.
- [7] Trzszczyński J., Galbarczyk P., Stanek R., Murzynowski W., *Wyniki realizacji Metody Pro Novum na bloku referencyjnym nr 1 w ENEA Elektrownia Połaniec – korzyści i możliwości jej komercjalizacji*. „Energetyka” 2022, Biuletyn Pro Novum nr 2/2022.
- [8] Grzesiczek E., Trzszczyński J., Rajca S., *Możliwości wydłużenia 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] Stanek R., Trzszczyński J., Dąbrowski M., *Diagnostyka jednego typu urządzeń w skali KSE z wykorzystaniem portalu internetowego integrującego informacje eksploatacyjne*. „Energetyka” 2017, Biuletyn Pro Novum nr 2/2017.

Parametryczne bliźniaki cyfrowe źródłem informacji i wiedzy dla bezpiecznej eksploatacji urządzeń i instalacji energetycznych

The parametric digital twins as a source of information and knowledge ensuring the safe operation of equipment and installations of power unit

Elementy krytyczne i duża część pozostałych urządzeń bloku energetycznego, są poddawane zmiennym obciążeniom termicznym i mechanicznym. Obciążenia te wpływają na ich trwałość w myśl zmęczenia termomechanicznego i jak również pełzania. Wykorzystując symulację komputerową (MES) możliwe jest wyznaczenie stanów naprężenia i przemieszczenia urządzeń energetycznych, a uzyskiwane wyniki symulacji pozwalają na określenie miejsc najbardziej wyłożonych oraz na oszacowanie zmian trwałości elementów. Model numeryczny może być sprowadzony do modelu zredukowanego, który odzwierciedla zachowanie modelu MES znacznie zmniejszając koszt obliczeniowy konieczny do prowadzenia symulacji, umożliwiając symulację działania elementów energetycznych w czasie rzeczywistym i z wysoką dokładnością. Zastosowanie modeli zredukowanych pozwala również na wdrożenie planów badań i remontów opartych na analizie pracy i rzeczywistego obciążenia urządzenia. W artykule zostanie przedstawiony przykład zastosowania podejścia do oceny bezpieczeństwa pracy elementów krytycznych z wykorzystaniem parametrycznych modeli zredukowanych i środowiska testowego firmy *Pro Novum*.

Słowa kluczowe: parametryczne bliźniaki cyfrowe, symulacja komputerowa (MES), eksploatacja urządzeń energetycznych

The critical components and other equipment of a power unit are subjected to variable thermal and mechanical loads. The loads cause variable stress state in components which influences their damage due to thermomechanical fatigue and creep. By the application of numerical simulation (FEM), it is possible to determine the stress state and displacements of the critical components. The obtained computation results allow to find the most stressed locations and to estimate changes in the components durability. The numerical models can be transformed to the reduced order models, which reflect the behavior of the FEM model, significantly reducing the computational cost and enable the analysis of stress state in real time and for simulated operation conditions. The application of PROM also allows implementing test and repair plans based on the analysis of the work and actual load of the components. In this paper an example of the approach to assessing the durability of critical components with the application of PMOR will be presented.

Keywords: parametric digital twins, numerical simulation (FEM), operation of power unit equipment

Elementy krytyczne urządzeń energetycznych, takie jak walczaki, komory, zawory i kadłuby turbin, jak również instalacje rurociągowy, poddawane są zmiennym obciążeniom termicznym i mechanicznym. Obciążenia te wywołują zmienny stan naprężenia elementów, a przez to wpływają na ich trwałość, zwłaszcza wskutek zmęczenia termomechanicznego oraz pełzania. W celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy elementów krytycznych urządzeń energetycznych oraz instalacji rurociągowych wykonuje się okresowe badania mające na celu ocenę ich aktualnego stanu technicznego. Badania uzupełnia się w wielu przypadkach obliczeniami stopnia wyczerpania trwałości. Czas dalszej pracy skaluje się na ogół w godzinach pracy urządzenia oraz liczbą uruchomień z poszczególnych stanów cieplnych.

Znaczna część bloków energetycznych oraz ich urządzeń ciepłno-mechanicznych pracuje jednak, od wielu lat, w trybie regulacyjnym. W takich przypadkach wyrażanie historii eksploatacji jak również prognozy trwałości poprzez liczbę godzin pracy daleko odbiega od rzeczywistości. Wyrażanie trwałości elementów urządzenia tylko wtedy posiada praktyczną wartość, gdy jest skojarzone z warunkami pracy analizowanymi w trybie off-line, gdy analiza dotyczy aktualnego stopnia wyczerpania trwałości oraz w trybie on-line, gdy odnosi się do prognozy trwałości [1-3].

Wykorzystując symulację komputerową (MES) możliwe jest wyznaczenie stanów naprężenia i przemieszczeń w urządzeniach energetycznych i instalacjach rurociągowych w trakcie ich pracy oraz w czasie uruchomień i odstawień. Wyniki symulacji pozwalają na określenie miejsc najbardziej wyłożonych oraz na oszacowanie zmian trwałości elementów. Niestety ze względu na rozmiar modeli numerycznych potrzebnych do uzyskiwania wysokiej jakości wyników obliczeń i średnie dostępne moce obliczeniowe stacji inżynierskich, czas symulacji uniemożliwia prowadzenie obliczeń w czasie rzeczywistym. Rozwiązaniem tego problemu jest sprowadzenie modelu numerycznego do modelu zredukowanego, który odzwierciedla zachowanie modelu MES znacznie skracając czas obliczeń oraz zmniejszając koszt wykonywania symulacji.

Parametryczne modele zredukowane umożliwiają symulację warunków pracy elementów energetycznych, takich jak komory przegrzewaczy, zawory itp., w czasie rzeczywistym i z wysoką dokładnością. Zastosowanie modeli zredukowanych pozwala na analizę stopnia wyczerpania trwałości oraz prognozowanie bezpiecznego czasu pracy elementów, co przekłada się na możliwość wdrożenia planów badań i remontów opartych na analizie rzeczywistych warunków pracy urządzenia. Bliźniaki cyfrowe stwarzają możliwość wykonywania

obliczeń w czasie rzeczywistym co sprawia, że mogą zostać wykorzystane do sterowania pracą bloków energetycznych. Tę możliwość wykorzystaliśmy w *Metodzie Pro Novum* do poprawy elastyczności oraz wydłużenia eksploatacji bloków klasy 200 MW [4-10].

Wstęp

Diagnostyka urządzeń i instalacji energetycznych jest skomplikowanym procesem, którego poprawne wykonanie wymaga specjalistycznej wiedzy w zakresie konstrukcji, technologii oraz ciepłno-mechanicznych i chemicznych warunków pracy poszczególnych elementów krytycznych, jak również całych urządzeń i instalacji rurociągowych. Dotychczas, i nadal w wielu przypadkach, wiedza i informacje o historii i warunkach pracy elementów pochodzą z klasycznie rozumianej retrospekcji, informacji od użytkownika urządzenia oraz doświadczeń zespołu diagnostycznego. Obecnie, wykorzystując zaawansowane technologie modelowania komputerowego oparte na MES oraz matematyczną redukcję modeli numerycznych, możliwe jest akcelerowanie dotychczasowej wiedzy, a przez to zwiększenie jakości wykonywanej diagnostyki.

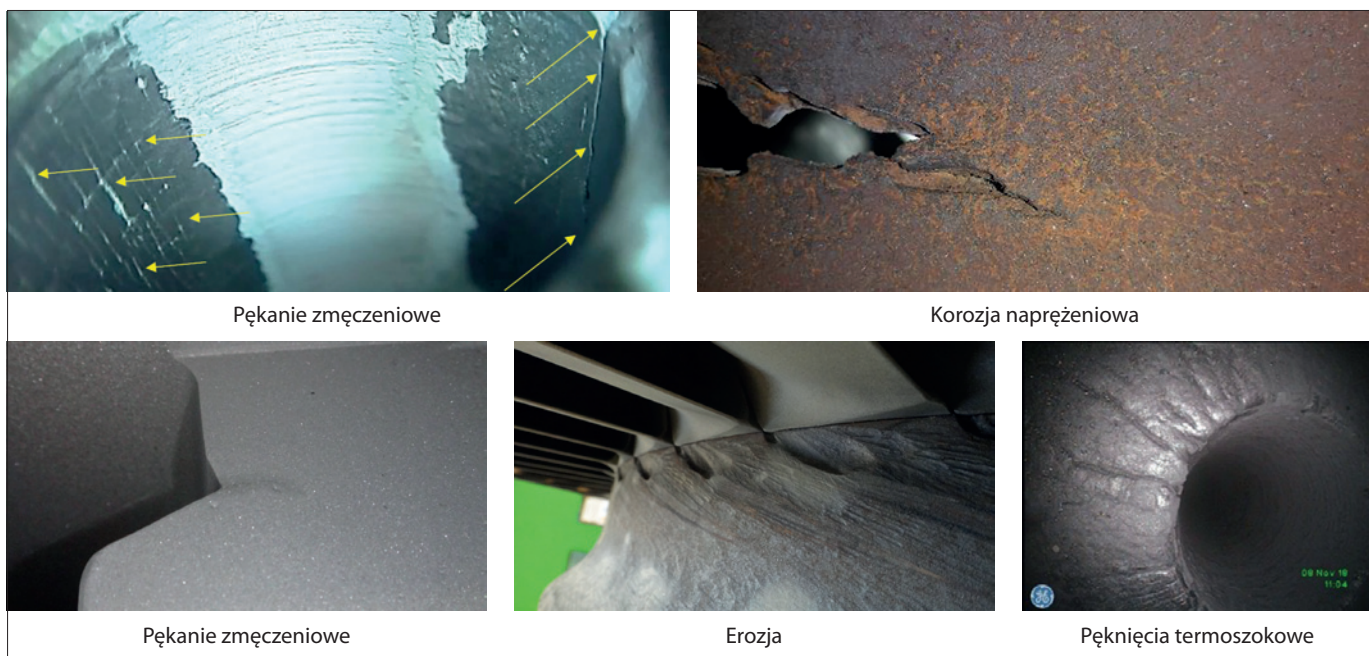
W artykule przedstawiono przykład możliwości zastosowania parametrycznych bliźniaków cyfrowych (Digital Twin) w celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji elementów krytycznych, które mogą ulegać uszkodzeniom na skutek pęcznienia, zmęczenia, erozji, korozji oraz termoszoku (rys. 1). O ile mechanizmy erozyjno-korozyjne mogą być tylko zidentyfikowane (np. za pomocą analizy warunków pracy), o tyle stopień wyczerpania trwałości elementów na wskutek zmęczenia czy pęcznienia można z powodzeniem określać z zastosowaniem technologii jw. na podstawie analizy ich rzeczywistych warunków pracy.

Modelowanie komputerowe elementów krytycznych

Pierwszym etapem modelowania komputerowego elementu krytycznego jest utworzenie jego modelu geometrycznego CAD. Model ten tworzony jest na podstawie dokumentacji technicznej oraz pomiarów wykonywanych na obiekcie rzeczywistym w trakcie remontów lub badań diagnostycznych. Aby zapewnić wysoką jakość modelu numerycznego należy zadbać o możliwie najdokładniejsze odwzorowanie geometryczne rzeczywistego elementu, uwzględniając aktualny stan obiektu spowodowany jego dotychczasową pracą, awariami, remontami oraz modernizacjami. W *Pro Novum* w celu tworzenia modeli geometrycznych (rys. 2) wykorzystywane są narzędzia pakietu ANSYS Workbench, tj. ANSYS SpaceClaim.

Komputerowy model geometrii urządzenia umożliwia zastosowanie różnych metod numerycznych, w tym takich, jak metoda elementów skończonych (MES) do symulacji stanów wyężenia materiału elementu. Dla potrzeb MES przygotowujemy jest model geometryczny, który dyskretyzuje się tworząc siatkę elementów skończonych (rys. 3). W zależności od geometrii elementu możliwe jest stosowanie regularnych siatek elementów heksagonalnych, cechujących się nie tylko dobrym odwzorowaniem geometrii, ale również wielkością wyników (np. naprężeń), przy niewielkich rozmiarach modelu numerycznego. Utworzenie takiej siatki wymaga odpowiedniego przygotowania geometrii, jednak znacznie skraca czas obliczeń modelu, w tym jego walidacji i utworzenia modelu zredukowanego.

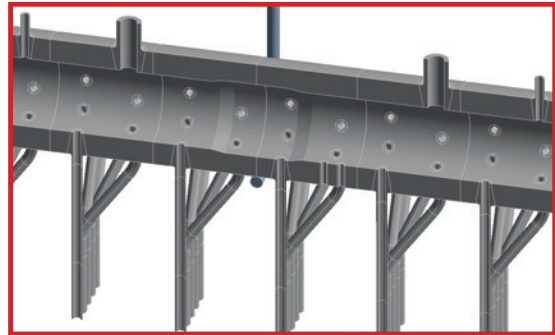
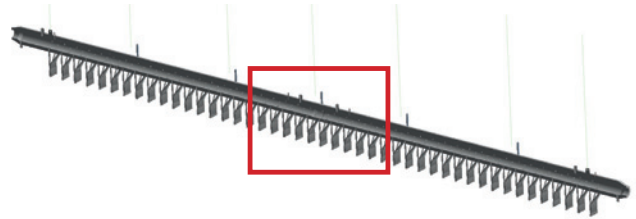
Dane materiałowe zasilające model numeryczny powinny być określone na podstawie badań materiałowych wykonanych na obiekcie rzeczywistym, gdyż własności zmieniają się wraz z eksploatacją materiału. W przypadku braku dostępu do takich badań należy korzystać z norm opisujących właściwości danego materiału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



Rys. 1. Przykłady uszkodzeń elementów krytycznych

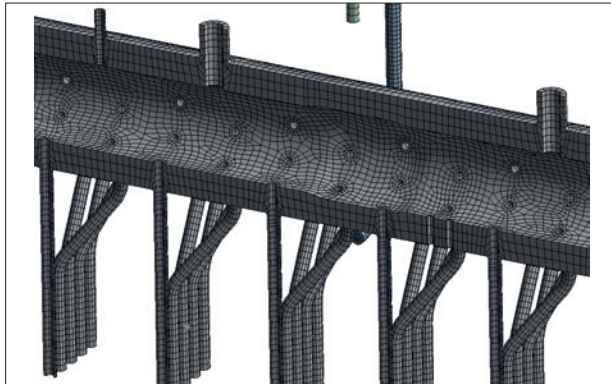


Geometria rzeczywistego obiektu

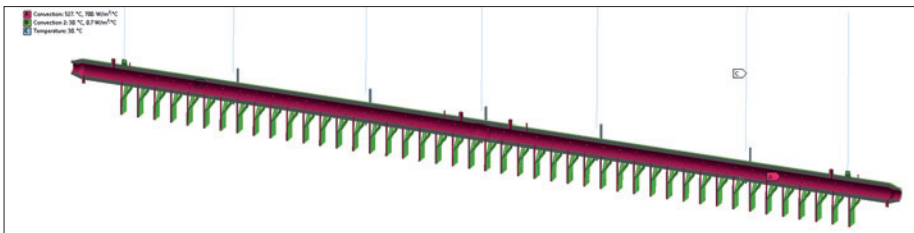


Model geometryczny

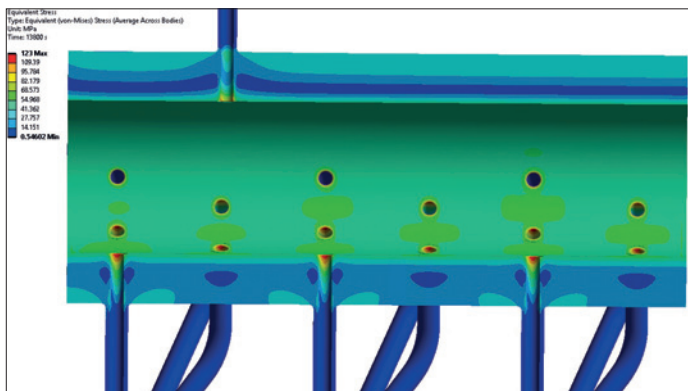
Rys. 2. Model geometryczny komory przegrzewacza



Rys. 3. Siatka elementów skończonych na fragmencie komory przegrzewacza



Rys. 4. Przykład zadanych warunków brzegowych



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

Znając charakter pracy elementu możliwe jest zadanie odpowiednich obciążeń i warunków brzegowych na model numeryczny i wykonanie symulacji komputerowej. W przypadku analizy elementów energetycznych najistotniejsze jest uwzględnienie obciążeń o charakterze termicznym oraz mechanicznym. Oddziaływania termiczne są bezpośrednio związane z przepływem medium roboczego przez instalację/urządzenie. Tego typu obciążenia mogą być modelowane za pomocą warunków konwekcyjnej wymiany ciepła. Informacje o wartościach obciążenia powinny być uzyskiwane oraz walidowane za pomocą danych procesowych z systemu kontrolno-pomiarowego elektrowni. Obciążenia mechaniczne związane są z ciśnieniem medium oraz wynikają z warunków współpracy z innymi urządzeniami.

Wynikami symulacji pracy urządzeń energetycznych (rys. 5) są ich stany termiczne w czasie eksploatacji, które wraz z obciążeniami mechanicznymi przekładają się na stan przemieszczeń i naprężeń. W celu walidacji modelu numerycznego otrzymywane przebiegi temperatury metalu oraz przemieszczeń należy porównywać z sygnałami z odpowiednich czujników zamontowanych na obiekcie rzeczywistym.

Parametryczne bliźniaki cyfrowe

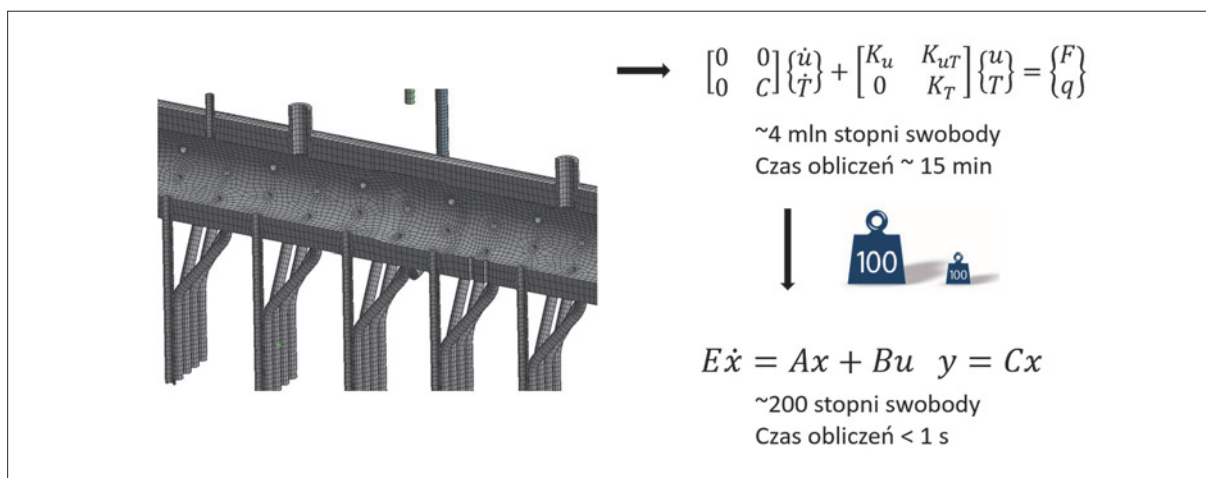
Model numeryczny po jego walidacji może posłużyć do utworzenia modelu zredukowanego urządzenia – parametrycznego bliźniaka cyfrowego, który pozwala na znaczne zmniejszenie rozmiaru modelu numerycznego (zmniejszenie liczby stopni swobody – niewiadomych modelu), co przekłada się na znaczny wzrost prędkości wykonywanych obliczeń. Zredukowany model numeryczny pozwala na prowadzenie obliczeń w czasie rzeczywistym umożliwiając ciągłe monitorowanie naprężeń wynikających z aktualnego stanu obciążenia elementu.

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

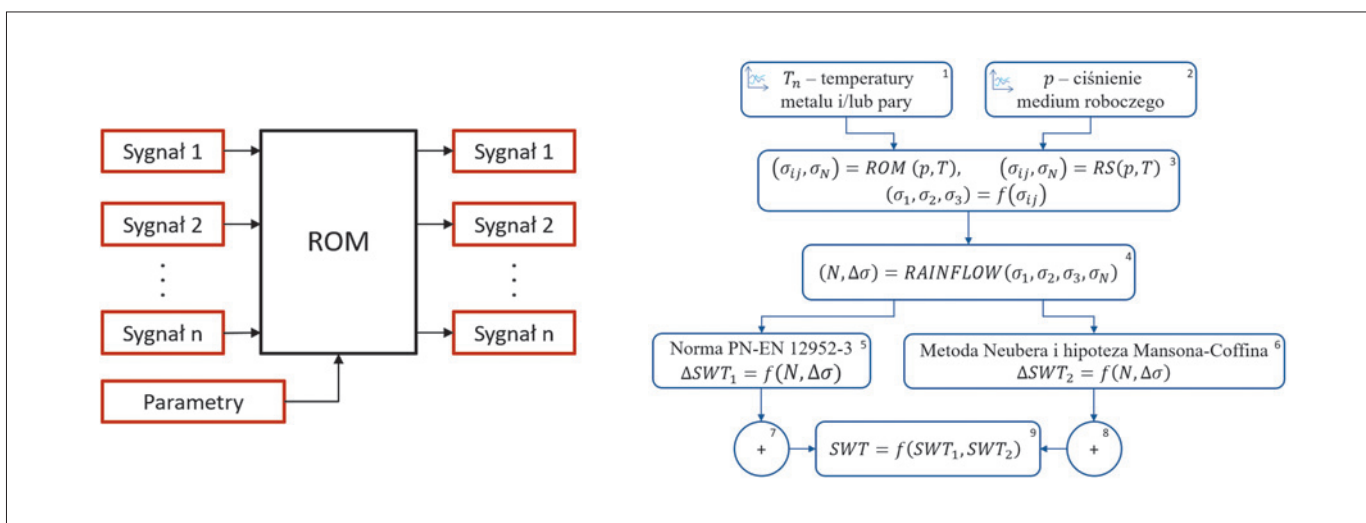
Zastosowanie cyfrowych bliźniaków – trwałość elementów krytycznych

Bliźniaki urządzeń energetycznych (ROM z ang. Reduced Order Model) implementuje się w odpowiednio do tego przygotowanym Systemie/Środowisku informatycznym *Pro Novum*, które umożliwia analizę stanu wytrzymałościowego elementów na podstawie rzeczywistych warunków pracy udostępnianych z systemu pomiarowego elektrowni w sposób zdalny. Wyniki analizy naprężeniowej z cyfrowych bliźniaków stanowią parametry wejściowe do specjalistycznych procedur obliczeniowych, np. związanej bezpośrednio ze stopniem wyczerpania trwałości (rys. 7). Równoległe takie same bliźniaki można zaimplementować w środowisku IT Elektrowni, a wyniki ich analiz udostępniać – w zależności od potrzeb – operatorom bloku i/lub specjalistom utrzymania majątku [8-10].

Ze względu na elastyczność opisaną procedurą diagnostyką z wykorzystaniem bliźniaków cyfrowych może być zastosowana do różnego typu elementów krytycznych, tj. kadłubów turbin i zaworów, instalacji rurociągowych, komór przegrzewaczy i schładzaczy (rys. 9) [7].



Rys. 6. Proces przygotowania cyfrowego bliźniaka elementu krytycznego

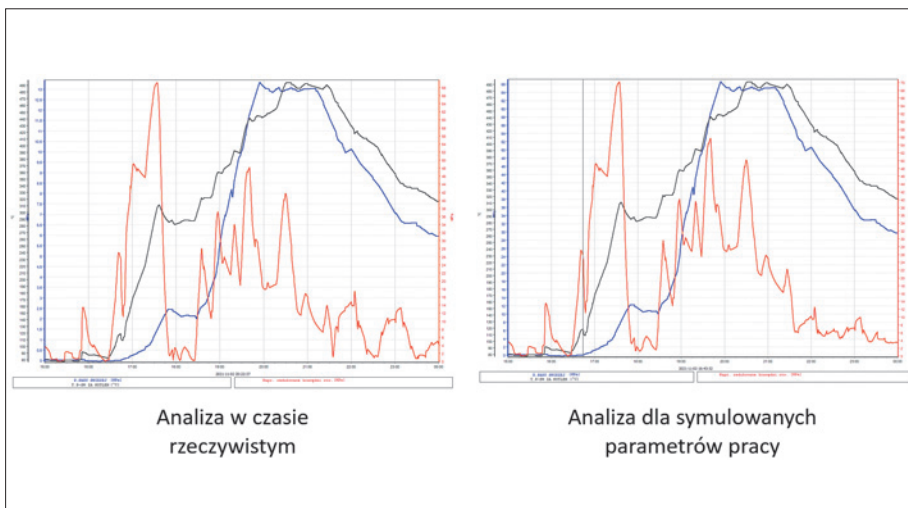


Rys. 7. Integracja cyfrowych bliźniaków z rzeczywistymi warunkami pracy elementów i procedurami obliczeniowymi

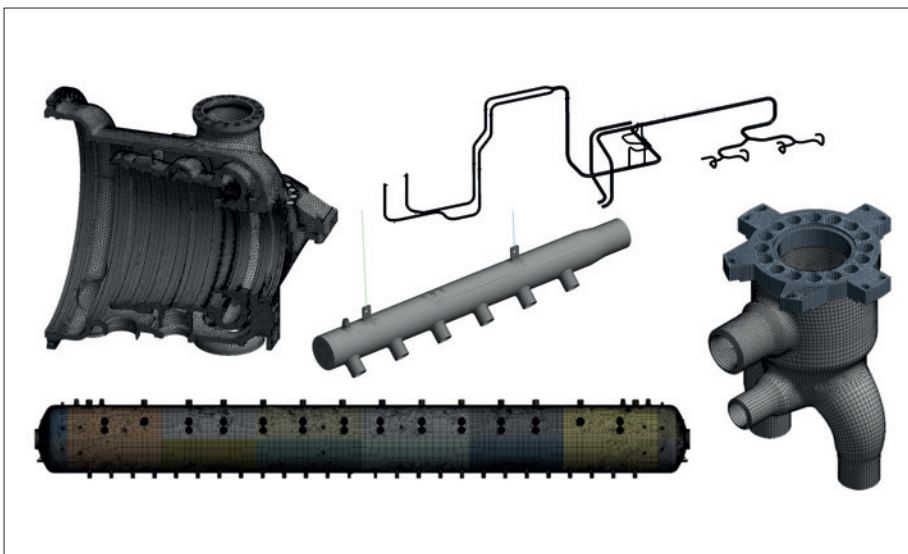
Blizniaki cyfrowe jako zrodlo wiedzy

Wazna cechą cyfrowych blizniaków, oprócz biezacej analizy naprezeniowej i trwaosciowej, jest takze mozliwosc symulowania innych/zmiennych warunkow pracy (rys. 8). W przypadku planowanej zmiany reżimu pracy urzadzzen i instalacji, w szybki i bezpieczny sposob, za pomoca cyfrowych blizniaków, mozliwe jest sprawdzenie czy planowane zmiany maja istotny wplyw na wytezenie i zmianę prognozowanej trwałości elementów. Symulacje takie umozliwiają takze wprowadzenie odpowiednich korekt w procedurach diagnostycznych, np. z uwagi na identyfikację nowych potencjalnych stref uszkodzen.

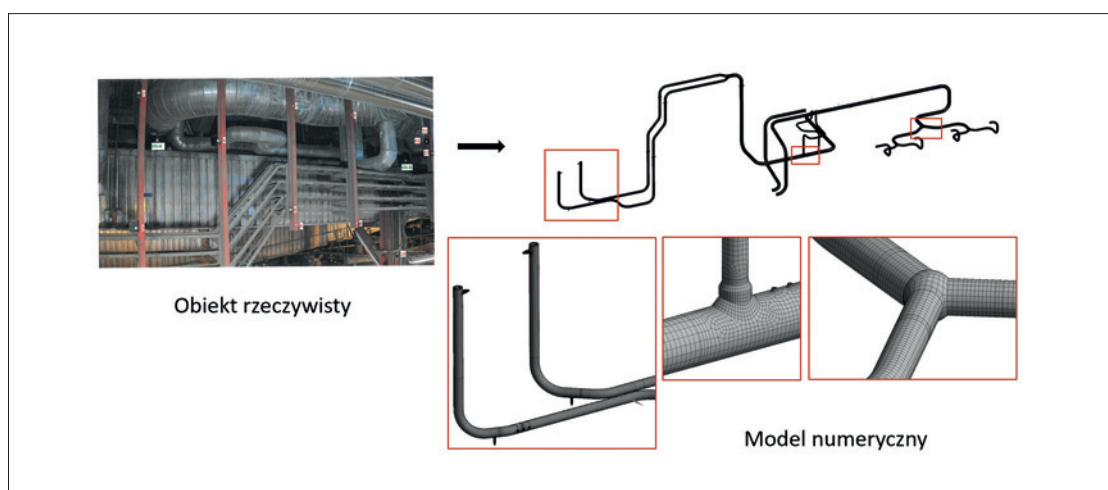
Wykorzystujac powyzsze mozliwosci blizniaków cyfrowych zostaly one zastosowane do wspierania procesu diagnostycznego glownych rurociagów parowych (GRP) bloku pracujacego na parametry nadkrytyczne. Blizniak GRP, powstaly na podstawie modelu matematycznego obiektu rzeczywistego (rys. 10), zostal zainstalowany jako element aplikacji do zdalnego nadzoru GRP (rys. 11) umozliwiajac zastosowanie eksperckich algorytmów diagnostycznych pracujacych w czasie rzeczywistym. Algorytmy te sluzą np. do nadzorowania mozliwosci wystapienia przeciwpadów, przekroczen naprezen dopuszczalnych oraz do analizy zmiany trwałości poszczegolnych elementów



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

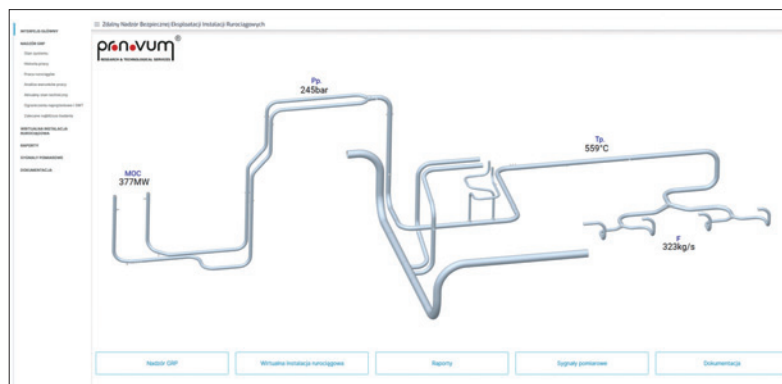


Rys. 9. Przykłady analizowanych elementów krytycznych i instalacji



Rys. 10. Modelowanie numeryczne rurociągu

Rys. 11. Interfejs aplikacji do nadzoru GRP



instalacji. Dane te mogą być również wynikami symulacji bliźniaka, prowadzonymi w celu prognozowania stanu technicznego elementów w zmieniających się warunkach eksploatacji (np. zmiany częstotliwości i/lub prędkości uruchomień bloku itp.).

Wykorzystując możliwości bieżących analiz oraz analiz na podstawie symulowanych warunków pracy rurociągu, a także integrację z odpowiednio przygotowanymi środowiskami informatycznymi w *Pro Novum* i Elektrowni, z zapewnieniem zdalnych dostępu, powstały warunki do sprawowania zdalnej diagnostyki GRP w sposób ograniczający prace i koszty w zakresie utrzymania stanu technicznego obiektu przy zachowaniu jego bezpieczeństwa.

Podsumowanie

Przedstawiona metoda umożliwia wykorzystanie analizy warunków pracy, symulacji komputerowej oraz koncepcji modeli zredukowanych do zdalnej analizy bezpieczeństwa eksploatacji elementów krytycznych urządzeń energetycznych. Umożliwia wykrywanie nieprawidłowości, ocenę stanu technicznego i weryfikację prognozy trwałości w czasie rzeczywistym, jak również symulowanie zmian trwałości w przyszłej eksploatacji. Dokładność metody jest zapewniona przez wykorzystanie rzeczywistych parametrów procesowych otrzymanych z instalacji pomiarowych elektrowni oraz modelowania opartego nie tylko na dokumentacji, ale także na podstawie inwentaryzacji obiektu oraz okresowych pomiarów i badań.

Zastosowanie cyfrowych bliźniaków opartych na modelach fizycznych obiektów rzeczywistych daje możliwość analizy szerokiej grupy elementów krytycznych bloku energetycznego, np. instalacji rurociągowych, komór (przegrzewaczy i schładzaczy), kadłubów zaworów i turbin. Parametryczne bliźniaki cyfrowe tworzone są z uwzględnieniem wyników badań elementów/instalacji, a także ich rzeczywistej konstrukcji nawet z nieprawidłowościami powstałymi na etapie wykonawstwa, montażu czy prac remontowych.

Zastosowanie modeli zredukowanych pozwala przede wszystkim na analizę stopnia wyczerpania trwałości oraz prognozowanie czasu bezpiecznej eksploatacji elementów, co przekłada się na możliwość wdrożenia planów badań i remontów opartych na analizie rzeczywistych warunków pracy urządzenia oraz oczekiwań eksploatacyjnych użytkownika. Bliźniaki cyfrowe stwarzają możliwość wykonywania obliczeń w czasie rzeczywistym, co sprawia, że mogą zostać wykorzystane do sterowania

pracą bloków energetycznych. Tę możliwość wykorzystaliśmy w *Metodzie Pro Novum* do poprawy elastyczności oraz wydłużenia eksploatacji bloków klasy 200 MW [4-10].

PIŚMIENNICTWO

- [1] Trzszczyński J., *Diagnostyka dziś i jutro*. „Energetyka” 2021, nr 2 (800).
- [2] Trzszczyński J., *Dokąd zmierza diagnostyka?* „Energetyka” 2021, nr 12, Biuletyn Pro Novum 2/2021.
- [3] Trzszczyński J., Murzynowski W., Biątek S., *Monitorowanie stanu technicznego urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków energetycznych przy wykorzystaniu platformy informatycznej LM System PRO+®*. „Dozór Techniczny” 2011, nr 5.
- [4] Trzszczyński J., Trzszczyńska E., *Diagnostic as a source of knowledge and strategy for units of coal flexible fired power plants*. “VGB PowerTech” 2020, No 9.
- [5] Trzszczyński J., Stanek R., Rajca S., Staszalek K., Sobczyński A., *Diagnostics of Long Time Operated Power Units Planned for Flexible Operation*. VGB Workshop „Materials and Quality Assurance”. 18-19 May 2017 in Maria Enzersdorf/Austria.
- [6] Trzszczyński J., Hattas M., Murzynowski W., *Digitalizacja środowiska diagnostycznego jako proces wspierający bezpieczeństwo i dyspozycyjność bloków energetycznych oraz możliwość poprawy ich elastyczności w niskonakładowy sposób*. „Nowa Energia” 2022, nr 2(83).
- [7] Trzszczyński J., Hattas M., Murzynowski W., *Wykorzystanie parametrycznych bliźniaków cyfrowych do analizy trwałości kadłubów turbiny podczas uruchomień*, „Energetyka” 2022, nr 3, Biuletyn Pro Novum 1/2022.
- [8] Trzszczyński J., *Wirtualne Środowisko Diagnostyczne*. „Energetyka” 2021, nr 6, Biuletyn Pro Novum 1/2021.
- [9] Kusibab M., Hattas M., Murzynowski W., *Architektura cyfrowego środowiska diagnostycznego wspierającego wdrożenie Metody Pro Novum na blokach klasy 200 MW*. „Energetyka” 2022, nr 6, Biuletyn Pro Novum 2/2022.
- [10] Trzszczyński J., *Poprawa elastyczności bloków klasy 200 MW poprzez wykorzystanie możliwości i rezerw po stronie sterowania oraz zapasów trwałości*. „Energetyka” 2022, nr 6, Biuletyn Pro Novum 2/2022.

Agnieszka Trzeba-Tobolska

ORLEN Serwis S.A.

Sławomir Rajca

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

Diagnostyka i remonty zapewniające bezawaryjną eksploatację turbozespołów w Zakładzie Elektrociepłowni PKN ORLEN S.A.

Diagnostics and repairs ensuring failure-free operation of turbine sets at Zakład Elektrociepłowni PKN ORLEN S.A.

Charakter pracy turbozespołów zainstalowanych w Zakładzie Elektrociepłowni PKN ORLEN S.A. tzn. wytwarzających parę technologiczną o określonych parametrach sprawia, że wymagania dotyczące wysokiej niezawodności oraz dyspozycyjności posiadają bardzo wysoki priorytet. Diagnostyka *Pro Novum* wykonywana od ponad 30 lat oraz wieloletnia współpraca z *ORLEN Serwis S.A.* dowodzą, że tak wysokie wymagania można spełnić korzystając ze specjalistów o najwyższych kwalifikacjach oraz stosując technologie remontowe zapewniające przywracanie pierwotnych cech użytkowych na drodze napraw, regeneracji oraz rewitalizacji, zwłaszcza stalowych elementów turbin. Aby sprostać takim wymaganiom wykonując diagnostykę łączymy klasyczne, sprawdzone metody badań z zaawansowanymi metodami analitycznymi oraz z wybranymi metodami zdalnej diagnostyki. Zwracamy szczególną uwagę na retrospekcje w zakresie analizy historii i warunków eksploatacji. Oceny stanu technicznego wykonywane są na podstawie wyników badań i analizy prac remontowych a prognozy trwałości weryfikujemy w trakcie eksploatacji turbozespołów.

Słowa kluczowe: diagnostyka *Pro Novum*, bezawaryjna eksploatacja turbozespołów, Zakład Elektrociepłowni PKN ORLEN S.A.

The nature of the operation of turbine sets installed at the PKN ORLEN S.A. Heat and Power Plant that is, producing technological steam with specific parameters makes the requirements for high reliability and availability a very high priority. *Pro Novum* diagnostics performed for over 30 years and many years of cooperation with *ORLEN Serwis S.A.* prove that such high requirements can be met with the use of specialists with the highest qualifications and the use of renovation technologies ensuring the restoration of the original functional features by means of repair, regeneration and revitalization, especially of cast steel turbine elements. In order to meet such requirements, when performing diagnostics, we combine classic, proven diagnostic methods with advanced analytical methods and selected methods of remote diagnostics. We pay special attention to retrospectives in the field of analysis of the history and conditions of operation. Assessments are made on the basis of the results of diagnostics and analysis of repair works, and the durability forecasts are verified during the operation of turbine sets.

Keywords: *Pro Novum* diagnostics, failure-free operation of turbine sets, Zakład Elektrociepłowni PKN ORLEN S.A.

ORLEN Serwis S.A.

ORLEN Serwis S.A. jest częścią Grupy Kapitałowej *ORLEN*. Ponadto sam tworzy Grupę Kapitałową *ORLEN Serwis*, w skład której wchodzi Spółki z:

- Czech – *ORLEN Serwis Ceska Republika s.r.o.*,
- Litwy – *UAB ORLEN Service Lietuva*.

ORLEN Serwis to prężnie rozwijająca się spółka z ponad 50-letnim doświadczeniem, posiadająca siedzibę w Płocku i swoje oddziały w Polsce w trzech lokalizacjach: Włocławku, Trzebini, Jedliczach.

Główna działalność Spółki skupia się na utrzymaniu ruchu instalacji przemysłowych, wykonawstwie remontów oraz usług diagnostyczno-pomiarowych. *ORLEN Serwis S.A.* w ramach Grupy Kapitałowej *ORLEN* należy do jednego z największych i najbardziej uznawanych pracodawców w Polsce. Spółka realizuje swoje usługi w branży automatycznej, mechanicznej, elektrycznej oraz maszyn wirujących na rzecz Grupy Kapitałowej *ORLEN*, w szczególności dla:

- *PKN ORLEN S.A.*,
- *ANWIL S.A.*



Rys. 1. *ORLEN Serwis S.A.* w Polsce



Rys. 2. ORLEN Serwis S.A. w Europie

Celem przedsiębiorstwa jest zwiększenie udziału w rynku usług remontowych i inwestycyjnych dla przemysłu rafineryjnego, petrochemicznego, chemicznego i energetycznego poprzez oferowanie wysokiej jakości usług.

Diagnostyka w remontach realizowanych przez ORLEN Serwis S.A.

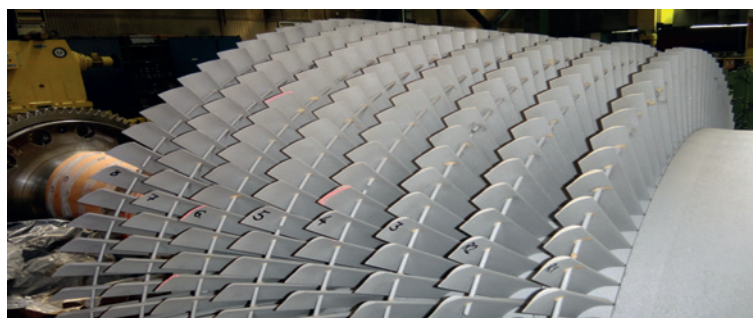
W ramach remontów kapitalnych realizowanych przez ORLEN Serwis S.A. wykonywane są badania diagnostyczne elementów krytycznych turbin oraz infrastruktury pomocniczej.

Analiza wyników wykonanych badań jest podstawą oceny stanu technicznego elementów, a także pozwala na:

- doszczegółowienie zakresu prac remontowych,
- ustalenie optymalnej technologii naprawy.

Bazując na połączeniu doświadczeń firmy remontowej i diagnostycznej, w korelacji z wymaganiami użytkownika turbosespołu, możliwe jest opracowanie optymalnych zakresów remontu, uwzględniając m.in.:

- różnice w konstrukcji,
- dane eksploatacyjne i informacje o zakłóceniach,
- wyniki poprzednich badań i zakresy wykonanych napraw,
- zalecenia z poprzednich raportów poremontowych,
- perspektywę dalszej eksploatacji dla urządzeń.



Rys. 3. Wirnik w trakcie badań diagnostycznych



Rys. 4. Wirnik w trakcie demontażu

ORLEN Serwis S.A. każdorazowo podejmuje współpracę z firmą diagnostyczną podczas remontów turbin energetycznych zlokalizowanych na terenie Zakładu Elektrociepłowni PKN ORLEN S.A.

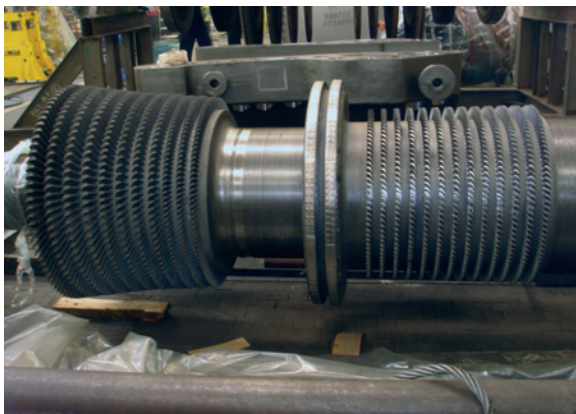
Współpraca pomiędzy ORLEN Serwis S.A. i firmą diagnostyczną

ORLEN Serwis S.A. współpracuje z firmami diagnostycznymi w zakresie:

- realizacji badań diagnostycznych,
- analizy i interpretacji uzyskanych wyników badań,
- formułowania zaleceń remontowych,
- nadzoru i/lub doradztwa inżynierskiego,
- analizy stanu technicznego urządzeń i prognozy ich dalszej eksploatacji,
- udziału w remontach kapitalnych turbosespołów według ustalonego harmonogramu na podstawie opracowań dyspozycyjności urządzeń, w tym m.in.:
 - napraw i rewitalizacji wysokotemperaturowych kadłubów zewnętrznych i wewnętrznych, komór zaworowych,
 - wymian topatek,
 - napraw (np. usuwanie nieciągłości).

Jako przykłady współpracy pomiędzy ORLEN Serwis S.A. a firmą diagnostyczną mogą posłużyć wymienione remonty, realizowane w latach 2019-2022:

- realizacja prac związanych z remontem średnim i kapitalnym turbiny upustowo-przeciwprężnej TG2 (2021 r., 2022 r.);
- realizacja prac związanych z remontem średnim i kapitalnym turbiny upustowo-przeciwprężnej TG3 (2020 r., 2021 r.);
- realizacja prac związanych z remontem średnim i kapitalnym turbiny upustowo-przeciwprężnej TG5 (2019 r.).



Rys. 5. Wirnik po remoncie



Rys. 6. Pracownicy ORLEN Serwis przy instalacji

Wsparcie diagnostyczne Pro Novum podczas remontów turbin realizowanych przez ORLEN Serwis S.A.

Pro Novum współpracuje z ORLEN Serwis w trakcie remontów średnich i kapitalnych w zakresie:

- diagnostyki podstawowej,
- diagnostyki zdalnej,
- diagnostyki zaawansowanej.

W zakresie diagnostyki podstawowej (rys. 7 i 8) współpraca sięga jeszcze lat 90-tych ubiegłego wieku.



Rys. 7. Strona tytułowa z oceny Tg3, Sprawozdanie Pro Novum nr 60.185/1992

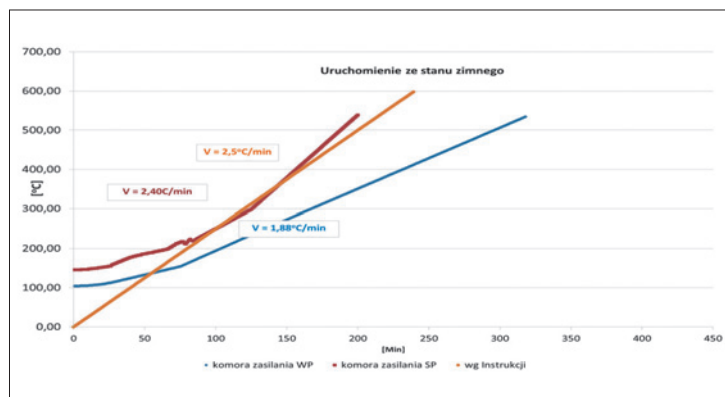


Rys. 8. Strona tytułowa z oceny Tg3, Sprawozdanie Pro Novum nr 69.3984/2021

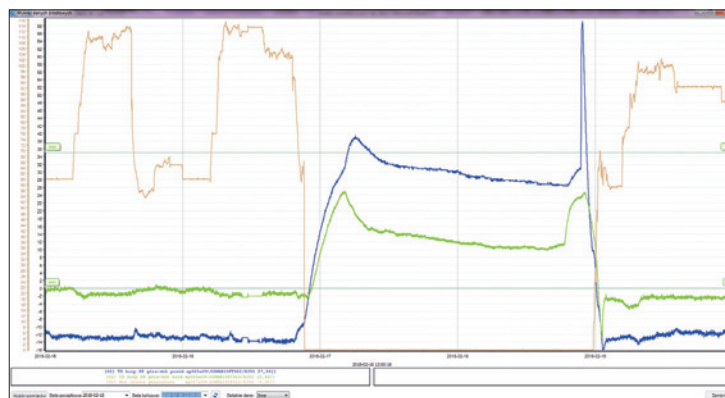
Obszar diagnostyki zdalnej/zaawansowanej rozwijany jest w Pro Novum od ok. dwudziestu lat. W Pro Novum wykorzystujemy możliwości diagnostyki zaawansowanej i zdalnej (rys. 9-11) jako jeden z obszarów pozwalających na lepszą, bardziej dokładną ocenę stanu technicznego elementów krytycznych.

Parametry pracy, na podstawie których:

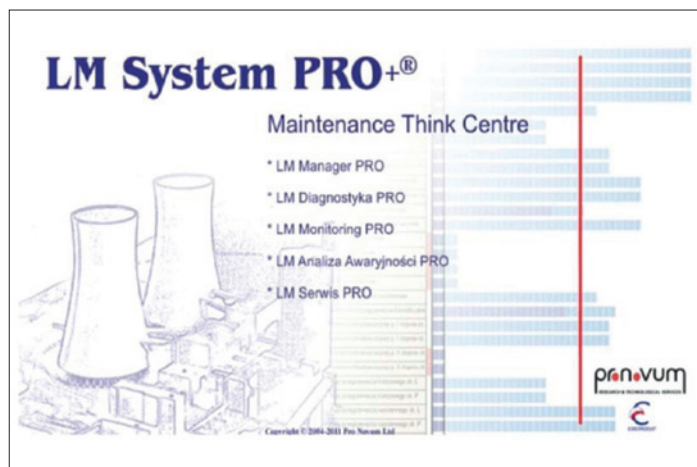
- jest dokonywana ocena stanu technicznego,
 - są ustalane przyczyny uszkodzenia,
 - jest określany nadzór diagnostyczny
- wybierane są pod kątem ich wpływu na trwałość (żywość) elementów turbiny.



Rys. 9. Analiza parametrów pracy



Rys. 10. Analiza parametrów pracy



Rys. 11. Platforma internetowa LM System PRO+



Rys. 12. Komora zaworowa w trakcie rewitalizacji



Rys. 13. Komora zaworowa w trakcie rewitalizacji



Rys. 14. Komora zaworowa po rewitalizacji



Rys. 15.

Udział Pro Novum w remontach turbin realizowanych przez ORLEN Serwis S.A.

Pro Novum współpracuje z ORLEN Serwis w trakcie remontów średnich i kapitalnych, głównie dotyczących remontów wirników i rewitalizacji grubościennych elementów stalowych – rysunki 12-14.

Podsumowanie

1. Każda turbina, ze względu na jej indywidualne cechy, takie jak:
 - historia i warunki pracy,
 - zakres i sposób prowadzenia prac remontowych,
 - konstrukcja,
 - oczekiwania eksploatacyjne
 wymaga indywidualnego podejścia do oceny jej stanu technicznego i remontu.
2. Remonty i utrzymanie ruchu w obszarze energetyki powinno powierzać się doświadczonym firmom posiadającym potencjał zasobowy i technologiczny.

Roman Michał Wojciechowski

Veolia Energia Poznań S.A.

Jerzy Trzeszczyński, Wojciech Murzynowski

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

Przykłady realizacji nadzoru diagnostycznego bloku BC 50

Examples of implementation of diagnostic supervision on the BC 50 power unit

Nadzór diagnostyczny wykonywany także w zdalnym trybie posiada w polskiej energetyce prawie dwudziestoletnią historię. Przed nią możliwa jest tak samo długa przyszłość, zarówno na blokach nowych jak i długo eksploatowanych w końcowej fazie ich rewersu, zwłaszcza gdy jego czas oraz okresy międzyremontowe nie mogą być odpowiednio wcześniej dokładnie określone. Ten rodzaj diagnostyki najczęściej jest źródłem informacji, bywa źródłem wiedzy, a gdy jest odpowiedniej jakości może być wykorzystany do weryfikacji prognozy trwałości, kreowania strategii eksploatacji oraz optymalizacji terminu i zakresu kolejnego remontu, które w ostatnich czasach stało się znacznie trudniejsze niż w przeszłości. W artykule zaprezentowano przykłady aplikacji diagnostycznych wykorzystywanych w Veolia Energia Poznań S.A. po ostatnim remoncie kapitalnym duobloku i w ramach nadzoru nad warunkową pracą uszkodzonej komory wylotowej pary pierwotnej kotła 1K1.

Słowa kluczowe: nadzór diagnostyczny, aplikacje diagnostyczne, Veolia Energia Poznań S.A.

Diagnostic supervision, also performed remotely, has almost twenty years of history in the Polish power industry. An equally long future is possible in front of it, both for new and long-operated units in the final phase of their service life, especially when its time and periods between overhauls cannot be precisely determined in advance. This type of diagnostics is most often a source of information, sometimes a source of knowledge, and when it is of appropriate quality, it can be used to verify the lifetime prognosis, create an operation strategy and optimize the date and scope of the next overhaul, which has recently become much more difficult than in the past. The article presents examples of diagnostic applications used in Veolia Energia Poznań S.A. after the last major overhaul of the duo-power unit and as part of supervision over the conditional operation of the damaged primary steam outlet header of the 1K1 boiler.

Keywords: diagnostic supervision, diagnostic applications, Veolia Energia Poznań S.A.

Nadzór diagnostyczny, wykonywany także w trybie zdalnym, posiada w polskiej energetyce prawie dwudziestoletnią historię. Przed nią możliwa jest tak samo długa przyszłość, zarówno na blokach nowych jak i długo eksploatowanych w końcowej fazie ich rewersu, zwłaszcza gdy jego czas oraz okresy międzyremontowe nie mogą być odpowiednio wcześniej dokładnie określone. Ten rodzaj diagnostyki najczęściej jest źródłem informacji, bywa źródłem wiedzy, a gdy jest odpowiedniej jakości może być wykorzystany do weryfikacji prognozy trwałości, kreowania strategii eksploatacji oraz optymalizacji terminu i zakresu kolejnego remontu, które w ostatnich czasach stało się znacznie trudniejsze niż w przeszłości.

Nadzór diagnostyczny w *Pro Novum* traktuje się jako system zintegrowany z eksploatacją urządzeń. Swój początek bierze podczas diagnostyki towarzyszącej remontowi, kontynuowany jest w trakcie eksploatacji urządzeń i instalacji. Wykorzystuje się zaawansowane technologie informatyczne oraz analityczne i cyfrowe, aby z odpowiednią jakością można było aktualizować ocenę stanu technicznego elementów, a także weryfikować ich prognozę trwałości.

Pro Novum, na podstawie kilkunastoletnich doświadczeń z wdrażaniem nadzoru diagnostycznego, udostępnia swoim Klientom odpowiednio skonfigurowane aplikacje informatyczne – oparte na platformie informatycznej LM System PRO+®. Zapewniają one bezpieczeństwo eksploatacji oraz oczekiwaną dyspozycyjność, także w przypadku gdy praca elementów odbywa się w trybie warunkowym.

W artykule zaprezentowano przykłady aplikacji diagnostycznych wykorzystywanych w Veolia Energia Poznań S.A. po ostatnim remoncie kapitalnym duobloku i w ramach nadzoru nad warunkową pracą uszkodzonej komory wylotowej pary pierwotnej kotła 1K1.

Veolia Energia Poznań S.A. – Elektrociepłownia II Karolin

W Elektrociepłowni II Karolin zainstalowane są dwa bloki BC 100 i BK 100 z kotłami OP-430 i jeden duoblok BC 50 z kotłami OP-140 (1K1 i 1K2) z tym, że w roku 2011 kocioł 1K1 przebudowany został na kocioł fluidalny typu BFB110. Dodatkowo w tejże lokalizacji znajdują się także dwa szczytowe kotły wodne PTWM. Całkowitą moc elektryczną i ciepłą Elektrociepłowni II Karolin zaprezentowano na rysunku 1.

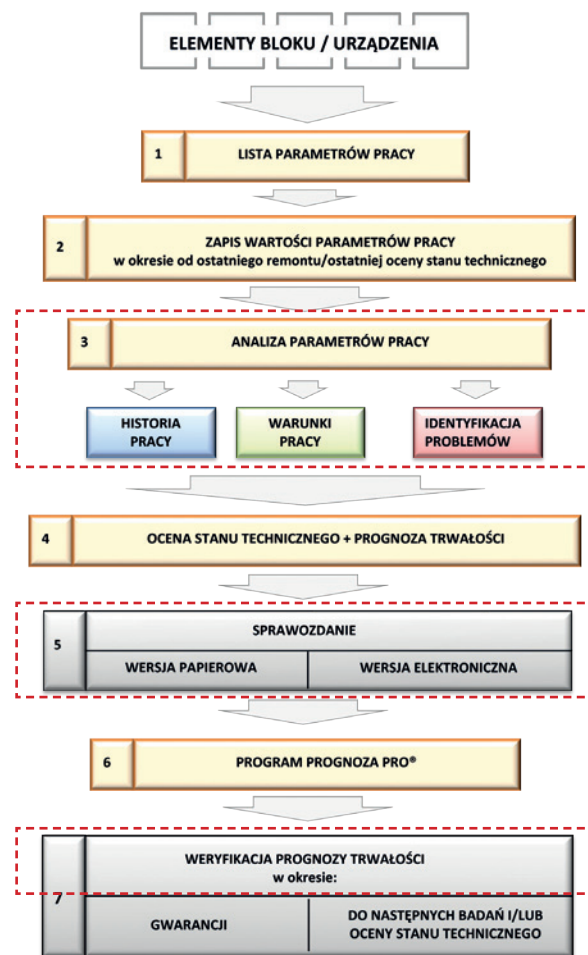
W skład bloku ciepłowniczego BC50 – oprócz wspomnianych powyżej kotłów 1K1 i 1K2 – wchodzi także turbop zespół TG1, tj. turbina parowa 13UP65 produkcji Zamechu i generator GTH63 produkcji Dolmelu. Czas pracy głównych urządzeń bloku BC 50 mieści się w granicach od ok. 210 000 do 237 000 godzin, a liczba uruchomień od 582 do 953 – stan na 31.07.2022 r.

Nadzór diagnostyczny bloku BC 50 po remoncie w 2021 roku

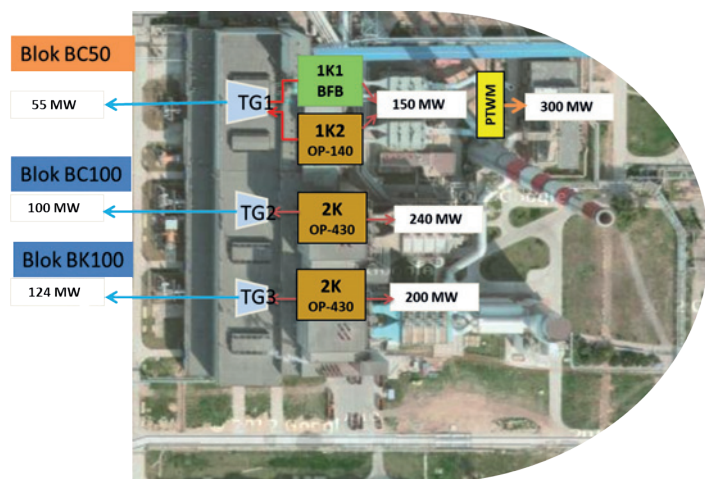
Ze względu na zidentyfikowane w czasie remontu nieprawidłowości/problemy, a także biorąc pod uwagę fakt, że planowanie terminów i zakresów kolejnych remontów obecnie jest znacznie trudniejsze niż w przeszłości, zaproponowano Użytkownikowi *Elektrociepłowni II Karolin* objęcie elementów bloku (po remoncie) nadzorem diagnostycznym z wykorzystaniem aplikacji informatycznej – opracowanej przez *Pro Novum* – Prognoza PRO® (rys. 2.). Aplikacja ta na podstawie retrospekcji i analizy warunków pracy umożliwia m.in. identyfikację problemów eksploatacyjnych i doprecyzowanie zakresu badań diagnostycznych.

Po opracowaniu oceny stanu technicznego i określeniu prognozy trwałości pozwala również na:

- bieżącą weryfikację prognozy,
- monitorowanie zidentyfikowanych w czasie remontu problemów,
- nadzór nad bezpieczeństwem podczas warunkowej eksploatacji elementów, którym nie udało się przywrócić ich pełnej użyteczności,
- aktualizację (w razie potrzeby) oceny stanu technicznego oraz prognozy trwałości.



Rys. 2. Proces przygotowania aplikacji Prognoza PRO®



Rys. 1. Urządzenia wytwórcze *Elektrociepłowni II Karolin*

Najważniejsze prace modernizacyjne przeprowadzone na bloku BC 50 obejmowały:

- zabudowę nowego wirnika WP na turbinie parowej w 2018 r.,
- przezwonienie stojana generatora,
- wymianę komory wylotowej przegrzewacza pary III st. kotła 1K1,
- rekonstrukcję elektrofiltra,
- wymianę głównych trójników rurociągów parowych,
- wymianę łożysk turbozespołu TG1,
- regenerację korpusów zaworów szybkozamykających i regulacyjnych.

Remont bloku BC 50 w 2021 roku

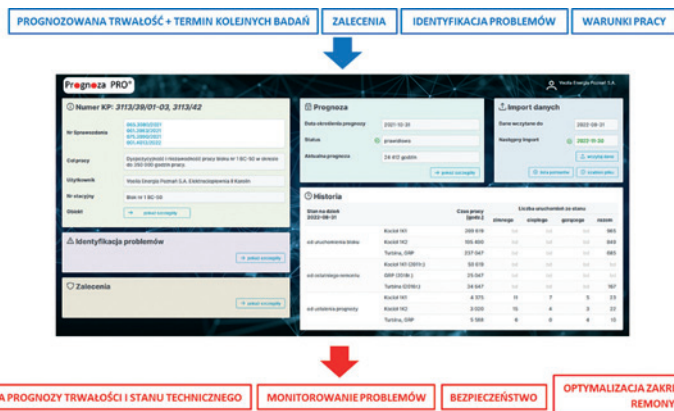
W roku 2021 blok ciepłowniczy przeszedł remont, w którym wykonano diagnostykę elementów krytycznych urządzeń bloku w zakresie zaprezentowanym w tabeli 1.

Dla każdego elementu opracowano prognozę trwałości, określono termin kolejnych badań oraz zalecenia remontowe, eksploatacyjne, a także zidentyfikowano nieprawidłowości/problemy wymagające nadzoru diagnostycznego.

Tabela 1

Zakres badań i obliczeń wykonanych w ramach remontu bloku BC 50 w 2021 r.

Urządzenie	Badania nieniszczące	Badania niszczące	Obliczenia	Analiza warunków pracy	Prognoza trwałości, termin kolejnych badań
Kocioł 1K1	•	•	SWT	•	•
Kocioł 1K2	•	•	SWT	•	•
RPŚ, do RS, RR, RWZ	•	•	SWT, owalizacja, AutoPipe	•	•
Turbina parowa	•	–	SWT, MES	•	•

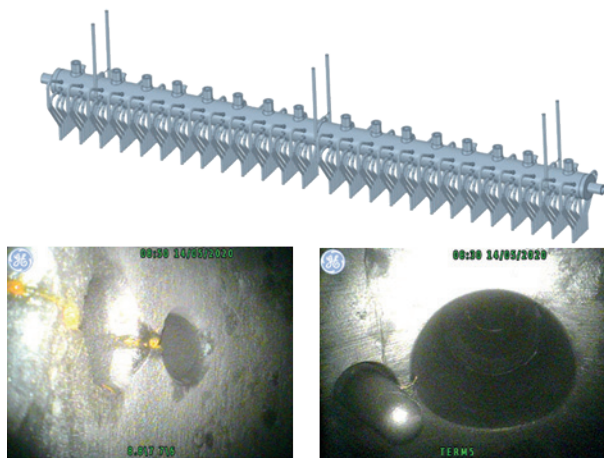


Rys. 3. Nadzór diagnostyczny elementów urządzeń bloku BC 50 zintegrowany z ich pracą

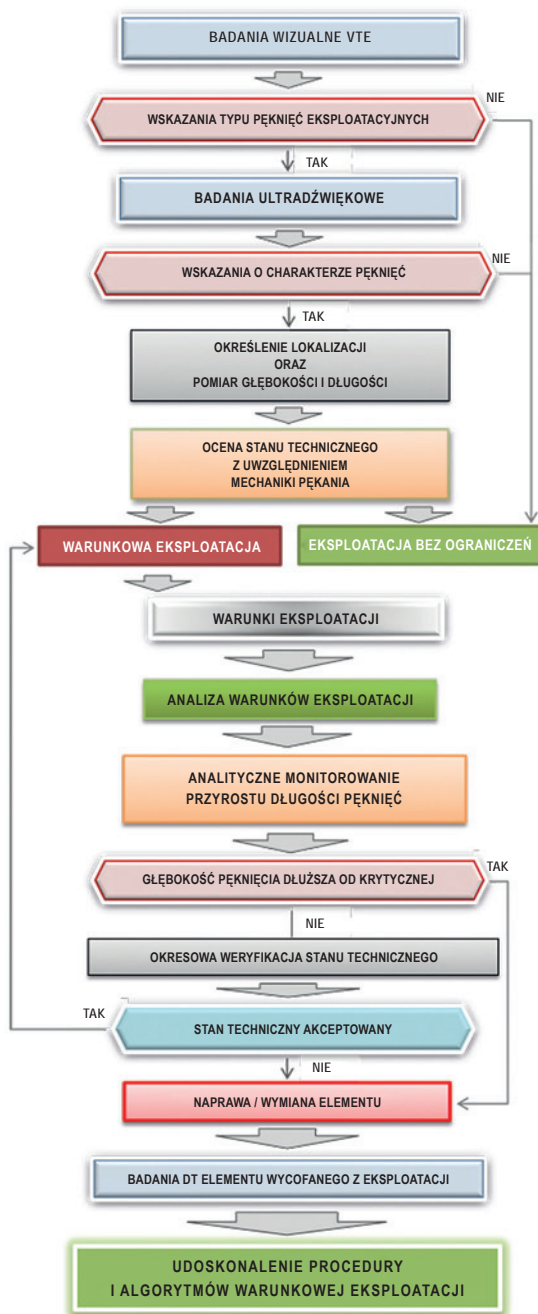
Nadzór diagnostyczny z wykorzystaniem aplikacji Progniza PRO® jest zintegrowany z pracą urządzeń. W ten sposób na bieżąco aktualizowana jest ocena ich stanu technicznego i monitorowane są zidentyfikowane problemy techniczne. Na rysunku 3 zaprezentowano ekran głównej aplikacji Progniza PRO® z zaznaczeniem danych wejściowych do analizy i ich rezultat.

Nadzór diagnostyczny nad warunkową pracą uszkodzonej komory kotła 1K1

Kolejnym rodzajem nadzoru diagnostycznego, który został wdrożony na bloku BC 50, był nadzór nad warunkową pracą uszkodzonej komory wylotowej przegrzewacza pary III stopnia kotła 1K1. W roku 2020, na powierzchni wewnętrznej komory jw., w badaniach NDT – na mostkach międzyotworowych – wykryto wskazania o charakterze pęknięć – rysunek 4. Uszkodzenia te były nienaprawialne, a prefabrykacja nowej komory i jej wymiana miały zająć sporo czasu. Podjęto zatem decyzję o możliwości pracy komory (do czasu jej wymiany) w trybie interwencyjnym według metody *Pro Novum* – rysunek 5, która umożliwia dalszą eksploatację takich komór jw., a także pracę elementów uszkodzonych, dla których wymiana lub naprawa stają się nieoptyczne z uwagi na zbliżający się koniec eksploatacji urządzenia/bloku.

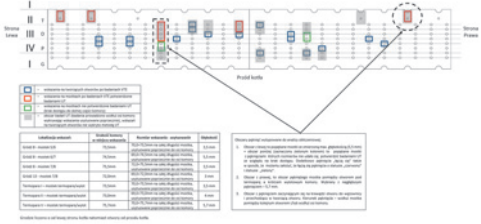
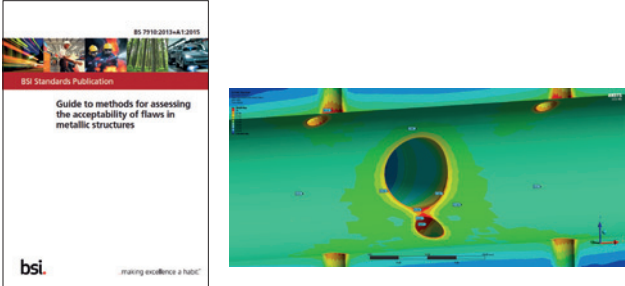
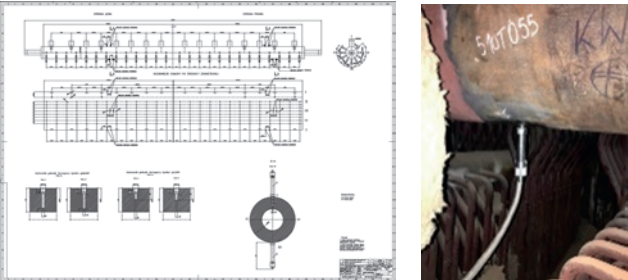

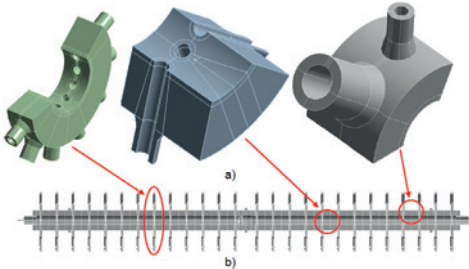



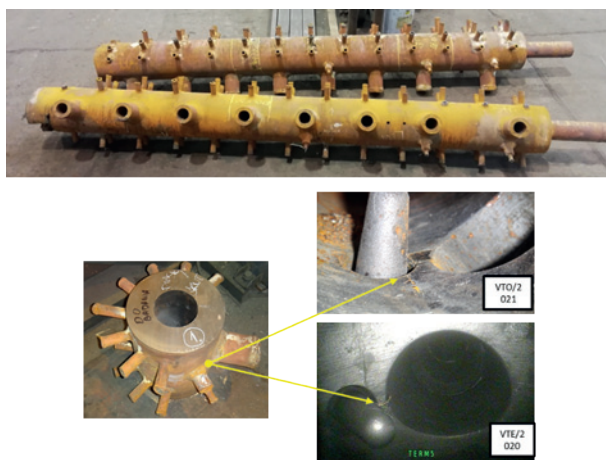
Rys. 4. Uszkodzenia na powierzchni wewnętrznej komory wylotowej przegrzewacza pary III stopnia kotła 1K1



Rys. 5. Schemat procesu nadzoru nad warunkową pracą uszkodzonej komory na bloku BC 50

Czynności wykonane w ramach nadzoru nad warunkową pracą uszkodzonej komory wylotowej przegrzewacza pary III stopnia kotła 1K1

Czynność	Wynik realizacji	
Badania NDT komory		
Ocena stanu technicznego komory z uwzględnieniem mechaniki pęknięcia – z wykorzystaniem normy BS7910:2013+A1:2015		
Audyt systemu pomiarowego		
Konsultacje techniczne ze specjalistami UDT i CLDT		
Przygotowanie cyfrowych bliźniaków z obszarów pękających komory		
Przygotowanie i uruchomienie aplikacji do sprawowania nadzoru nad warunkową pracą komory. Integracja aplikacji z warunkami pracy komory		



Rys. 6.
Komora wylotowa
przegrzewacza pary III stopnia
wycofana z eksploatacji
i jej fragmenty wybrane
do badań niszczących

Aby dopuścić komorę wylotową do dalszej pracy w trybie nadzoru diagnostycznego należało wykonać szereg czynności, które przewiduje metodyka *Pro Novum* – rysunek 5, a których zakres i wyniki syntetycznie zaprezentowano w tablicy 2.

Łączny okres nadzoru nad warunkową pracą komory wyniósł 10 miesięcy. W tym czasie komora pod nadzorem, w sposób bezpieczny, pracowała 6055 godzin i miała 30 uruchomień. Przygotowano 4 okresowe raporty z przeprowadzonych analiz, które były weryfikowane przez specjalistów UDT i stanowiły podstawę do dopuszczenia kotła do dalszej eksploatacji.

Zgodnie z zaleceniem *Metody Pro Novum* dotyczącym badań elementu wycofanego z eksploatacji, komorę – po jej wymianie – poddano kompletowi badań niszczących – rysunek 6.

Wykonanie badań niszczących komory wycofanej z eksploatacji pozwoliło na weryfikację modelu obliczeniowego i potwierdziło słuszność założeń i metod wykorzystanych przy jego tworzeniu. Brak wyraźnego przyrostu pęknięć określonego w ramach nadzoru diagnostycznego został potwierdzony w przeprowadzonych badaniach niszczących. Prawdopodobną przyczyną powstałych pęknięć na mostkach analizowanej komory były szoki termiczne w trakcie uruchomienia tego kotła.

Podsumowanie

1. Niepewność terminu i zakresu kolejnego remontu nie powinna ograniczać dyspozycyjności, a zwłaszcza zagrażać bezpieczeństwu eksploatacji bloku/urządzenia/installacji.
2. Oferowany przez *Pro Novum* nadzór diagnostyczny (także w trybie zdalnym) jest rodzajem diagnostyki, który:
 - jest źródłem informacji,
 - bywa źródłem wiedzy,
 - może być wykorzystany do weryfikacji prognozy trwałości,
 - kreuje strategię eksploatacji,
 - optymalizuje termin i zakres kolejnego remontu.

3. Nadzór diagnostyczny w trybie interwencyjnym stwarza możliwość bezpiecznej, warunkowej eksploatacji elementów ze wskazaniami o charakterze pęknięć do czasu ich wymiany lub zakończenia eksploatacji urządzenia/bloku energetycznego.
4. Zaprezentowana i opracowana przez *Pro Novum* metodyka nadzoru diagnostycznego wykorzystuje nowoczesne narzędzia i sprawdzone algorytmy do analizy możliwości bezpiecznej pracy elementów /urządzeń w przewidzianym czasie.
5. Dzięki współpracy i wdrożeniu nadzoru diagnostycznego (w dwóch wersjach) na bloku BC 50 w *Veolia Energia Poznań S.A.* firma *Pro Novum* zyskała możliwość weryfikacji swoich metod diagnostycznych i ich dalszego rozwoju, a swojemu Klientowi oferuje nadzór diagnostyczny nad bezpieczeństwem pracy urządzeń bloku.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Wojciechowski M.R., Górka M., Staszatek K., Sobczyszyn A., Brunné K., Kusibab M., *Weryfikacja bezpieczeństwa warunkowo eksploatowanych elementów kotłów parowych na podstawie badań niszczących po ich demontażu*. „Energetyka” 2021, nr 12, Biuletyn Pro Novum nr 2/2021.
- [2] Trzszczyński J., Murzynowski W., Stanek R., *Nadzór diagnostyczny elementów grubościennych kotła K-5 w Elektrowni Dolna Odra w okresie ich warunkowej eksploatacji – zastosowana metodyka i doświadczenia po dwuletniej eksploatacji*. „Energetyka” 2020, nr 12, Biuletyn Pro Novum nr 2/2020.
- [3] Trzszczyński J., Murzynowski W., *Nadzór diagnostyczny nad warunkową eksploatacją uszkodzonych schładzaczy do czasu ich wymiany lub naprawy*. „Energetyka” 2019, nr 6, Biuletyn Pro Novum nr 1/2019.

Wykorzystanie badań metalograficznych w diagnostyce elementów pracujących w warunkach pełzania

The use of metallographic tests in the diagnostics of elements operating under creep conditions

Jedną z podstawowych metod badawczych służących jako jedno z narzędzi oceny stanu technicznego elementów są badania metalograficzne. W energetyce powszechnie stosowana jest technika replik triafolowych. Umożliwia ona prowadzenie badań w sposób nieniszczący, czyli w warunkach przemysłowych bezpośrednio na obiekcie w sposób powtarzalny, bez konieczności pobierania próbek. Ponadto oprócz oceny mikrostruktury w danym momencie eksploatacji, badania te, dzięki odpowiednio opracowanym zakresom ich wykonania, pozwalają na uzyskiwanie informacji o stopniu zaawansowania procesów degradacji mikrostruktury podczas całej lub długotrwałej eksploatacji elementów.

Słowa kluczowe: badania metalograficzne, technika replik triafolowych, diagnostyka

One of the basic diagnostic methods used as one of the tools for assessing the technical condition of elements is metallographic testing. In the power sector, the technique of triafol replicas is commonly used. It enables non-destructive testing, i.e. in conditions, directly on the object, in a repeatable manner, without the need to take samples. In addition, apart from the assessment of the microstructure at a given moment of operation, these tests, thanks to properly developed ranges of their implementation, allow obtaining information on the degree of advancement of microstructure degradation processes during the entire or long-term operation of the elements.

Keywords: metallographic testing, technique of triafol replicas, diagnostics

Wstęp

Stabilność stali Cr-Mo, Cr-Mo-V o mikrostrukturze ferrytyczno-perlitycznej, ferrytyczno-bainitycznej oraz nowoczesnych stali martenzytycznych typu 9-12%Cr stosowanych w energetyce stanowi ważny aspekt w diagnostyce elementów pracujących w warunkach pełzania. Eksploatacja w temperaturze wyższej niż graniczna, naprężenie oraz długi czas eksploatacji tych elementów prowadzą do stopniowej degradacji mikrostruktury stali, a w konsekwencji do obniżania ich własności mechanicznych oraz pojawienia uszkodzeń. Jedną z podstawowych technik badawczych służących do oceny stanu materiału są badania mikrostrukturalne. Duże znaczenie w diagnostyce odgrywają badania nieniszczące, do których zalicza się badanie metalograficzne metodą replik matrycowych. Podstawową zaletą tej metody jest możliwość prowadzenia badań w warunkach przemysłowych bezpośrednio na obiekcie. Wykonanie replik matrycowych na tym samym elemencie w kolejnych cyklach remontowych umożliwia uzyskanie informacji o stopniu zaawansowania procesów degradacji mikrostruktury w czasie eksploatacji. Analiza mikrostruktury pracujących elementów wzbogacona innymi badaniami pozwala na ocenę stanu technicznego i prognozowanie czasu ich bezpiecznej pracy.

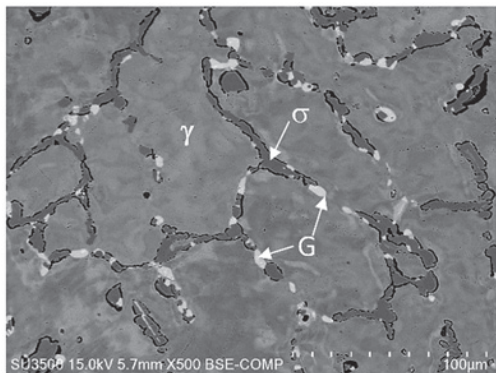
Techniki badań metalograficznych

Stosowane w diagnostyce elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania badania metalograficzne mają głównie na celu charakterystykę mikrostruktury badanego elementu oraz na tej podstawie określenie czasu dopuszczenia go do dalszej bezpiecznej eksploatacji. Badania te można podzielić według różnych kryteriów. Jednym z nich jest podział rodzaju zastosowanego preparatu do badań, którym może być wycinek elementu lub stosowana bardzo często, szczególnie w warunkach przemysłowych, replika matrycowa. Zarówno wycinek jak i replika mają swoje zalety oraz ograniczenia.

W przypadku badań metalograficznych z wykorzystaniem wycinków elementów dużą zaletą jest to, że przygotowanie powierzchni zglądu do obserwacji odbywa się w warunkach laboratoryjnych z możliwością wielokrotnego poprawienia niedoskonałości wykonania powierzchni zglądu. Podstawowe cechy pozytywne oraz ograniczenia wynikające z obserwacji mikrostruktury z wykorzystaniem zglądów metalograficznych, to:

- możliwość obserwacji mikrostruktury na przekroju badanego elementu, o ile tak został pobrany;
- oprócz uzyskania informacji o ilościowym charakterze mikrostruktury stali (udział faz i składników struktury – ferrytu, austenitu, perlitu/bainitu, wielkość ziarna, wielkość i rozmieszczenia wydzielań) również informacje jakościowe pozwalające określić typ wydzielań (rys. 1), ich przybliżony skład chemiczny czy rozdział pierwiastków stopowych pomiędzy fazy występujące w mikrostrukturze;

- zapewnienie dużej trafności w ocenie stopnia wyczerpania trwałości eksploatacyjnej;
- niszczący charakter badania powodujący konieczność naprawy poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych elementów, co nie w każdym przypadku ze względu na przepisy Urzędu Dozoru Technicznego jest możliwe do wykonania.



Rys. 1. Identyfikacja różnego typu wydzieli w mikrostrukturze stali austenitycznej, zgiąd metalograficzny, pow. 500x, trawione Mi19Fe, obserwacja techniką elektronów wstecznie rozproszonych BSE w skaningowym mikroskopie elektronowym

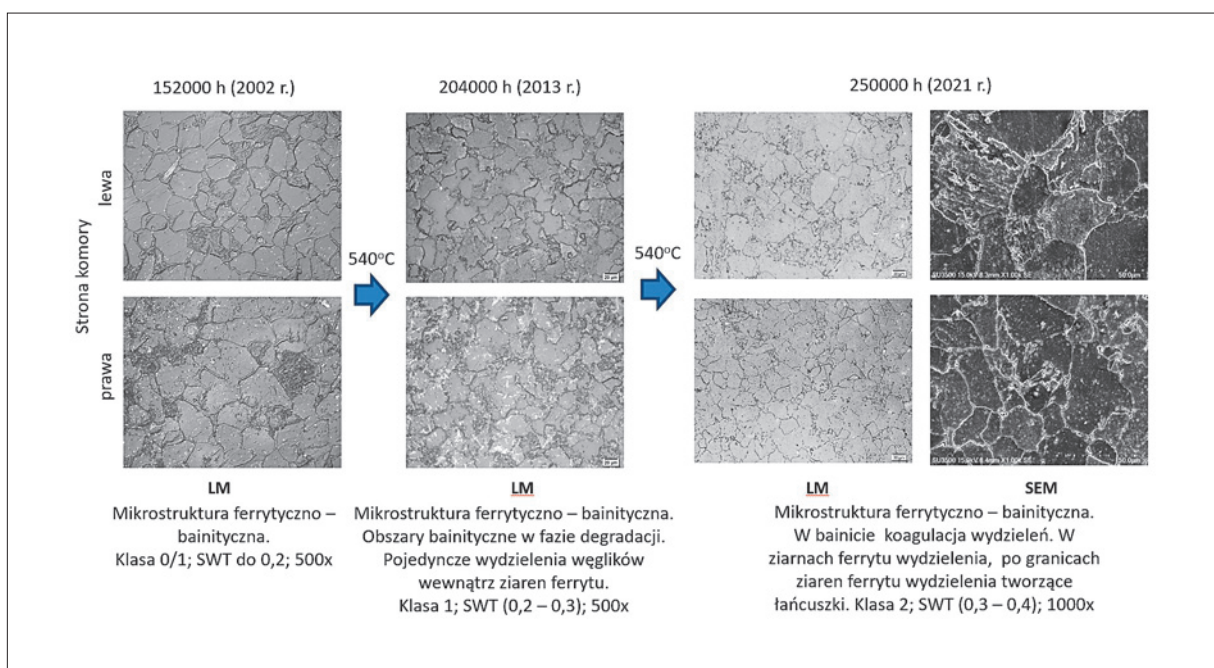
Stosowana w badaniach metalograficznych technika replik matrycowych, mimo pewnych ograniczeń, jest powszechnie stosowana w badaniach diagnostycznych ze względu na przewagę korzyści, jakie daje jej wykorzystanie. Do tych korzyści i ograniczeń należy zaliczyć:

- łatwość zastosowania – badanie nieniszczące możliwe do wykonania praktycznie na każdym elemencie kotła czy rurociągu, do którego jest możliwy dostęp badacza;

- możliwość porównania wyników badań metalograficznych uzyskiwanych z upływem czasu (np. w kolejnych remontach) w tym samym obszarze, dzięki czemu zapewnia możliwość obserwacji zmian mikrostruktury (degradacji obszarów bainitu/perlitu, procesów wydzieleniowych i koagulacji cząstek) podczas eksploatacji elementów w warunkach przemysłowych (rys. 2);
- badanie to pozwala tylko na obserwację i analizę ilościową mikrostruktury powierzchni badanego elementu, co może powodować obserwację zmienionej technologicznie mikrostruktury i wpływać negatywnie na trafność oceny stopnia wyczerpania eksploatacyjnego elementu.

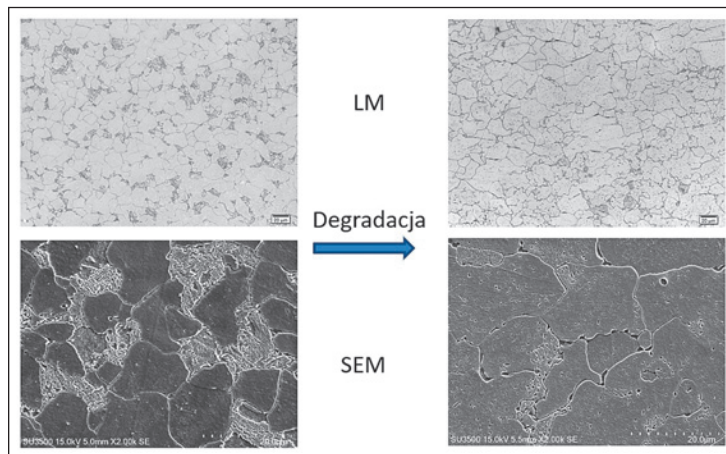
W diagnostyce inżynierskiej podstawową obserwację mikrostruktury przeprowadza się z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej (LM) przy powiększeniach do 1000x. Pozwala ona na określenie ogólnego charakteru mikrostruktury, identyfikację elementów występujących w mikrostrukturze, takich jak: ferryt, perlit/bainit, martenzyt, austenit wydzielenia oraz ujawnienie uszkodzeń wewnętrznych, takich jak: mikroszczeliny czy mikro-pęknięcia. Technika ta umożliwia również określenie wielkości ziarna oraz pozwala na określenie stopnia wyczerpania trwałości eksploatacyjnej.

Mała zdolność rozdzielcza oraz niewielka głębia ostrości obiektywów mikroskopu świetlnego sprawia, że obecnie główną techniką w badaniach metalograficznych jest skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM), którą wykorzystuje się w diagnostyce. Technika ta zapewnia uzyskanie odpowiednio wysokiej jakości obrazów (rys. 3). Umożliwia ona identyfikację szczegółów mikrostruktury, co jest niezbędne do jej sklasyfikowania i wynikającego z tego stopnia wyczerpania trwałości, a docelowo określenia czasu dopuszczenia elementu do dalszej bezpiecznej eksploatacji.



Rys. 2. Kolejne stadia degradacji mikrostruktury stali 10H2M na przykładzie wyników badań komory wylotowej IV^o przegrzewacza pary pierwotnej, replika matrycowa, trawione nitałem [1-3]

Rys. 3. Porównanie jakości obrazu uzyskanego za pomocą mikroskopu świetlnego (LM) i skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), stal 15HM, replika matrycowa, powiększenia: LM – 500x, SEM – 2000x, trawione nitałem



Tablica 1

Przykłady obrazów mikrostruktury z replik nieprawidłowo wykonanych

Rodzaj uszkodzenia repliki	Obrazy mikrostruktury	
Niedostateczne szlifowanie/polerowanie		
Nieprawidłowe przeprowadzenie trawienia		
Niedokładne oczyszczenie powierzchni zglądu po trawieniu		
Duże zapylenie na obiekcie przemysłowym		

Trafność oceny w badaniach metalograficznych

Badania metalograficzne, jak każda metoda badawcza, są obarczone błędem. Na trafność oceny mikrostruktury głównie w przypadku replik matrycowych wpływ ma wiele czynników (tabl. 1). Można je generalnie podzielić na niezależne (obiektywne) oraz zależne (subiektywne) od osoby wykonującej badanie metalograficzne.

Do przyczyn obiektywnych można zaliczyć:

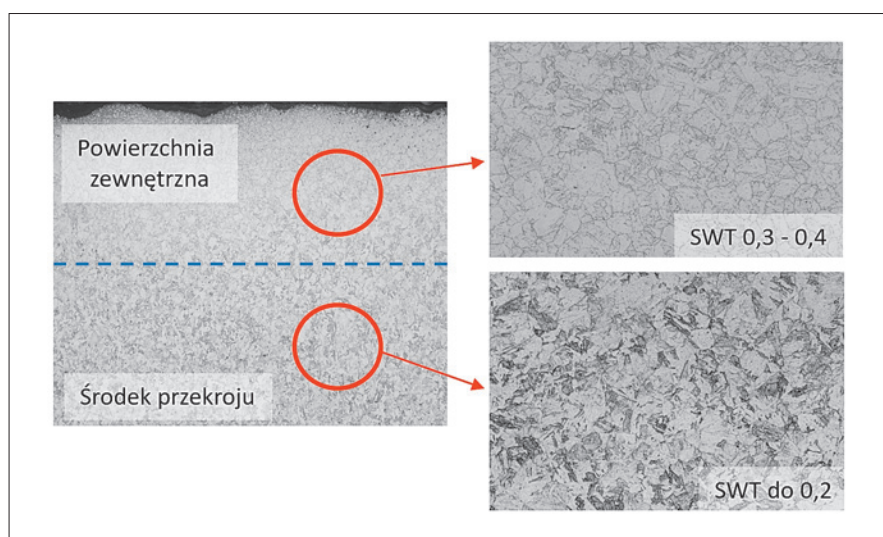
- trudny dostęp do miejsca pobrania repliki, który wpływa na jakość jej wykonania;
- zapylenie na obiekcie, powodujące pojawianie się na przygotowanym zgładzie wielu artefaktów utrudniających ocenę mikrostruktury;
- presję czasu wynikającą np. z konieczności wykonania znacznej ilości replik do pobrania na obiekcie oraz krótkiego terminu wykonania zleconej pracy.

Na przyczyny subiektywne składają się:

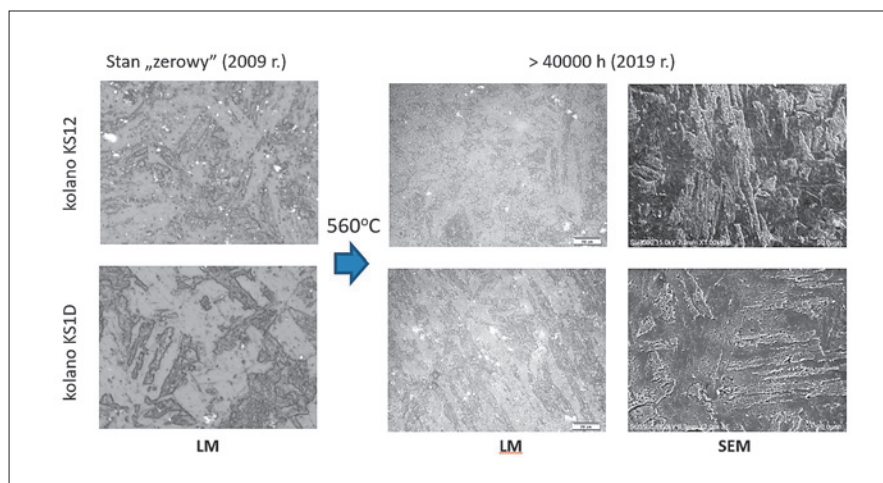
- niedostateczne szlifowanie/polerowanie,
- niedotrąwienie lub przetrąwienie zgładu metalograficznego,
- niedokładne oczyszczenie powierzchni zgładu po wytrawieniu,
- zbyt szybkie ściągnięcie folii.

Trafność oceny mikrostruktury zależy również od prawidłowo lub nieprawidłowo przeprowadzonych procesów technologicznych. Typowymi przykładami takich przyczyn mogą być: odwęglenie warstwy zewnętrznej elementu lub zmieniła powierzchnia elementu poprzez nagrzewanie przed procesem gięcia. Skutkuje to przede wszystkim zawyżeniem stopnia degradacji mikrostruktury w stosunku do rzeczywistego, co zaprezentowano na rysunku 4.

Ważną funkcją przy trafności oceny pełnią badania metalograficzne elementu nowo zabudowanego w urządzeniu o tzw. mikrostrukturze stanu zerowego, które również mogą być obarczone zawyżeniem stopnia wyczerpania trwałości. Eksploatacja takiego elementu i badania w kolejnym cyklu remontowym pozwalają ocenić czy i w jakim stopniu zaszły zmiany w jego mikrostrukturze w odniesieniu do stanu zerowego. Przykład takiej oceny przedstawiono na rysunku 5, na którym mikrostruktura niektórych nowych elementów wykonanych ze stali P911 ma wyższy niż zerowy stopień wyczerpania trwałości eksploatacyjnej. Wykonane badania metalograficzne po eksploatacji około 40 000 godzin w temperaturze 560°C nie wykazały zmian w mikrostrukturze obserwowanej z wykorzystaniem LM oraz SEM, co świadczy o stabilności mikrostruktury.



Rys. 4. Zróżnicowana mikrostruktura na przekroju elementu, stal P911, zgład metalograficzny, pow. 200x i 1000x, trawione Mi19Fe



Rys. 5. Mikrostruktura martenzytu odpuszczonego stali P911, klasa 1, SWT (0,2 - 0,3); 1000x, replika matrycowa, pow. 1000x., rurociąg pary świeżej [4]

Podsumowanie

1. Stosowanie mikroskopii świetlnej w analizie mikrostruktury w wielu przypadkach jest wystarczające, jednak duże uszczegółowienie możliwych do zaobserwowania stanów struktury determinuje stosowanie skaningowej mikroskopii elektronowej.
2. Badania mikrostruktury (szczególnie z wykorzystaniem replik), jak każda metoda badawcza, są również obciążone pewnym błędem. Trafność oceny jest wypadkową jakości przygotowanego preparatu, techniki obserwacji oraz kompetencji personelu, przy czym wzrasta proporcjonalnie do degradacji mikrostruktury.
3. Określony na podstawie badań mikrostruktury stopień wyczerpania trwałości eksploatacyjnej elementu ma dużą wagę w ostatecznej ocenie jego przydatności do dalszej pracy, jednak powinien być wsparty innymi badaniami i/lub obliczeniami.
4. W analizach eksperckich, oprócz znajomości bieżącego stopnia wyczerpania trwałości eksploatacyjnej (stanu mikrostruktury), ważna jest historia zmian mikrostrukturalnych począwszy od stanu dostawy. Pozwala to na śledzenie procesów degradacji mikrostruktury zachodzących w pracującym elemencie.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 011.3926/2021, Ocena stanu technicznego kotła oraz głównych rurociągów parowych bloku nr 1 w *TAURON Wytwarzanie Spółka Akcyjna – Oddział Elektrownia Siersza w Trzebini* oraz bloku nr 6 w *TAURON Wytwarzanie Spółka Akcyjna – Oddział Elektrownia Jaworzno III w Jaworznie*.
- [2] Raport z badań i pomiarów diagnostycznych nr 316.2889/2002, *LBM Pro Novum*.
- [3] Raport z badań i pomiarów diagnostycznych nr 237.80076/2013, *LBM Pro Novum*.
- [4] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 042.3957/2021, Ocena stanu technicznego wraz z określeniem prognozy trwałości oraz badania metalograficzne metodą replik SEM badanych elementów głównych rurociągów parowych bloku nr 10 w *TAURON Wytwarzanie Spółka Akcyjna – Oddział Elektrownia Łagisza w Będzinie*.
- [5] Raport z badań i pomiarów diagnostycznych nr 3.5542/2009, *LBM Pro Novum*.

- [6] Golański G., Kolan C., Brunné K., Staszatek K., *Mikrostruktura i właściwości mechaniczne stali bainitycznej Cr-Mo po eksploatacji*, „Energetyka” 2022, nr 3.
- [7] Golański G., Trzeszczyński J., Kolan C., *Mikrostruktura i właściwości mechaniczne stali P911 po długotrwałej eksploatacji w temperaturze 560°C*, „Energetyka” 2022, nr 3.
- [8] Wojciechowski M.R., Górka M., Staszatek K., Sobczyszyn A., Brunné K., Kusibab M., *Weryfikacja bezpieczeństwa warunkowo eksploatowanych elementów kotłów parowych na podstawie badań niszczących, po ich demontażu*. „Energetyka 2021, nr 12.
- [9] Staszatek K., Sobczyszyn A., Brunné K., *Uszkodzenia różnorodnych złączy spawanych w elementach przegrzewacza pary kotła na parametry nadkrytyczne*, Energetyka 2021, nr 9.
- [10] Staszatek K., Brunné K., Sobczyszyn A., *Uszkodzenia wybranych elementów ciśnieniowych pracujących w warunkach pełzania*, „Energetyka” 2020, nr 12.
- [11] Zbroińska-Szczuchura E., Staszatek K., Brunné K., Sobczyszyn A., *Przykłady uszkodzeń rur powierzchni ogrzewalnych charakterystyczne dla obecnych warunków eksploatacji kotłów*, „Energetyka” 2019, nr 12.
- [12] Wytyczne Urzędu Dozoru Technicznego nr 1/2015, *Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania*.
- [13] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 011.3926/2021, Ocena stanu technicznego kotła oraz głównych rurociągów parowych bloku nr 1 w *TAURON Wytwarzanie Spółka Akcyjna – Oddział Elektrownia Siersza w Trzebini* oraz bloku nr 6 w *TAURON Wytwarzanie Spółka Akcyjna – Oddział Elektrownia Jaworzno III w Jaworznie*.
- [14] Raport z badań i pomiarów diagnostycznych nr 316.2889/2002, *LBM Pro Novum*.
- [15] Raport z badań i pomiarów diagnostycznych nr 237.80076/2013, *LBM Pro Novum*.
- [16] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 042.3957/2021, Ocena stanu technicznego wraz z określeniem prognozy trwałości oraz badania metalograficzne metodą replik SEM badanych elementów głównych rurociągów parowych bloku nr 10 w *TAURON Wytwarzanie Spółka Akcyjna – Oddział Elektrownia Łagisza w Będzinie*.
- [17] Raport z badań i pomiarów diagnostycznych nr 3.5542/2009, *LBM Pro Novum*.

Diagnostyka wspierająca remonty i eksploatację turbin parowych

Diagnostics supporting the repairs and operation of steam turbines

Wieloletnia współpraca ZRE Katowice SA oraz Pro Novum Sp. z o.o. zaowocowała w przeszłości wieloma ciekawymi i innowacyjnymi projektami, które nadal przynoszą korzyści nie tylko polskim elektrowniom. Projekty te, zwłaszcza rewitalizacja stalowych elementów turbin parowych, pozwoliły w przeszłości i nadal pozwalają unikać ich kosztownych wymian. W obszarze diagnostyki materiałowej Pro Novum stanowi wsparcie i uzupełnienie potencjału ZRE Katowice. Takie podejście umożliwia wspólną realizację prac opartych na diagnostyce klasycznej (bazującej na sprawdzonych metodach badań) oraz wykorzystującej zaawansowane metody analityczne i informatyczne, w tym zwłaszcza – dostosowane do bieżących potrzeb – komponenty zdalnej diagnostyki. W referacie wyżej opisane podejście zaprezentowano na przykładzie dwóch remontów zrealizowanych w ostatnim czasie przez ZRE Katowice z udziałem Pro Novum.

Słowa kluczowe: diagnostyka wspierająca remonty, zdalna diagnostyka, ZRE Katowice SA, Pro Novum Sp. z o.o.

The long-term cooperation of ZRE Katowice SA and Pro Novum sp. z o.o. has resulted in past many interesting and innovative projects that continue to benefit not only Polish power plants. These projects, especially the revitalization of cast-steel elements of steam turbine, have helped to avoid their costly replacements. In the area of diagnostics, Pro Novum supports and supplements the potential of ZRE Katowice. This approach enables joint implementation of works based on classical diagnostics (based on proven testing methods) and using advanced analytical and IT methods, including in particular – adapted to the current needs – elements of remote diagnostics. In the paper, the above-described approach is presented on the example of two overhauls carried out recently by ZRE Katowice with the participation of Pro Novum.

Keywords: diagnostics supporting the repairs, remote diagnostics, ZRE Katowice SA, Pro Novum Sp. z o.o.

Współpraca firmy remontowej i firmy diagnostycznej

Zakłady Remontowe Energetyki SA praktycznie od początku istnienia Pro Novum współpracują z tą Firmą. Ponad 30-letnia współpraca zaowocowała wieloma wspólnie zrealizowanymi projektami z obszaru turbin, wśród których można wymienić:

- wykonywanie badań diagnostycznych wraz z analizą ich wyników oraz formułowaniem zaleceń remontowych,
- współudział w wybranych procesach remontowych,
- ocena stanu technicznego urządzenia, sformułowanie prognozy wraz z jej warunkami.



Rys. 1. Wirnik NP turbiny typu 200 MW w trakcie oględzin

30-letnia współpraca zaowocowała również wspólnie wdrożonymi technologiami, takimi jak:

- kompleksowe remonty tarcz kierowniczych, w tym żeliwnych,
- rewitalizacja stalowych elementów turbin parowych.

Proces rewitalizacji stalowych elementów turbin został opracowany przez firmy Pro Novum i ZRE Katowice blisko 25 lat temu. Połączenie wiedzy i doświadczeń firmy remontowej i diagnostycznej zapewniło, i nadal zapewnia, pewność i wysoką jakość procesu, co oznacza, że bez konieczności powtarzania jakiegokolwiek czynności uzyskujemy zakładaną geometrię i trwałość zrewitalizowanych elementów stalowych. Dotychczas wspólnie zrewitalizowano ponad 200 stalowych elementów praktycznie wszystkich typów turbin. Warto podkreślić, że również w bieżącym roku realizowaliśmy wspólnie projekty z tego obszaru.

Na rysunkach 2-7 przedstawiono przykłady rewitalizowanych w 2022 r. elementów.

Remont turbiny 7UCK68 jako przykład współpracy ZRE Katowice i Pro Novum

W trakcie badania elementu krytycznego, jakim jest wirnik (rys. 8) stwierdzono między innymi:

- pęknięcia czterech łopatek (rys. 9 i 10),
- pęknięcia na mostkach otworów pod nity łopatki zamkowej (rys. 11),
- ubytki korozyjne o zwiększającej się intensywności wzdłuż układu przepływowego, największe na łopatkach ostatniego stopnia.



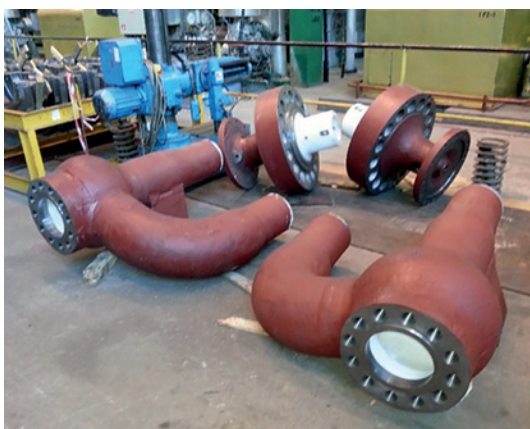
Rys. 2. Kadłub SP turbiny typu 200 MW przygotowywany do obróbki cieplnej



Rys. 3. Kadłub SP turbiny typu 200 MW po remoncie i rewitalizacji



Rys. 4. Komory zaworowe SP turbiny typu 200 MW po remoncie i rewitalizacji



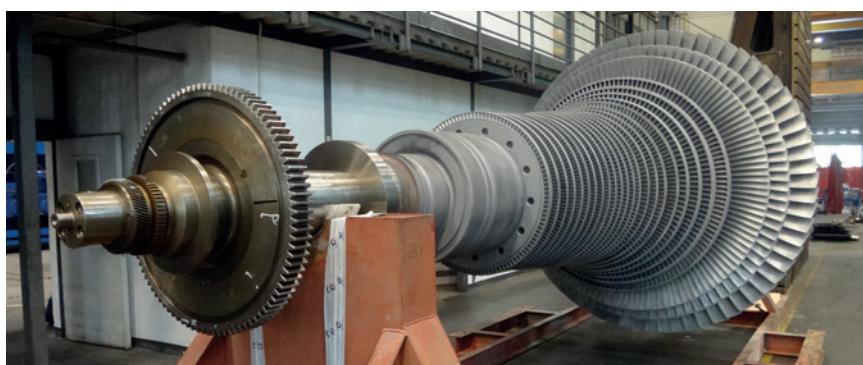
Rys. 5. Komory zaworowe SP turbiny typu 50 MW po remoncie i rewitalizacji



Rys. 6. Kadłub wewnętrzny turbiny typu 50 MW po remoncie i rewitalizacji



Rys. 7. Kadłub wewnętrzny turbiny typu 50 MW po remoncie i rewitalizacji



Rys. 8. Wirnik turbiny typu 7UCK68



Rys. 9. Dwie z pękniętych łopatek, wynik badania magnetyczno-proszkowego



Rys. 10. Pęknięta łopaska, wynik badania wizualnego



Rys. 11. Pęknięcia na mostku łopatki zamkowej, wynik badania magnetyczno-proszkowego

W ramach remontu uszkodzonego stopnia *ZRE Katowice* wykonano następujące prace:

- stoczono uszkodzone obrzeże,
- odbudowano przez spawanie obrzeże,
- odtworzono wrąb i zatopkowano go nowymi łopatkami.

Wirnik w trakcie remontu pokazano na rysunkach 12-14.



Rys. 12. Wirnik w trakcie remontu



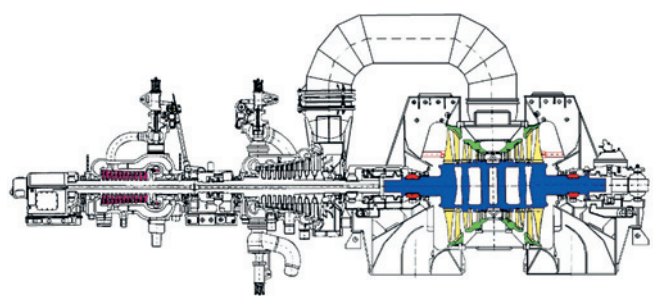
Rys. 13. Wirnik z odbudowanym wrębem



Rys. 14. Wirnik w trakcie remontu

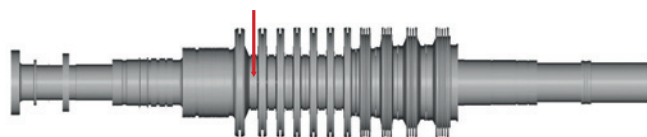
Remont turbiny typu 200 MW jako przykład współpracy *ZRE Katowice* i *Pro Novum*

W 2022 roku *Pro Novum*, na zlecenie *ZRE Katowice SA*, realizowało prace mające na celu wykonanie badań oraz oceny żywotności wirników turbiny typu 200 MW (rys. 15).



Rys. 15. Układ przepływowy turbiny typu 200 MW

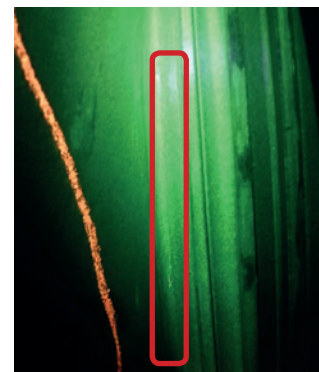
W trakcie badań diagnostycznych wirnika SP (rys. 16) stwierdzono pęknięcia obwodowe za stopniem nr 1 (rys. 17 i 18).



Rys. 16. Wirnik SP turbiny typu 200MW, lokalizacja pęknięcia

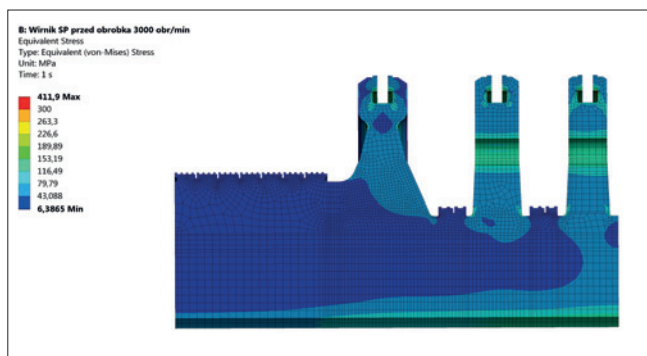


Rys. 17. Pęknięcie za pierwszym stopniem wirnika SP

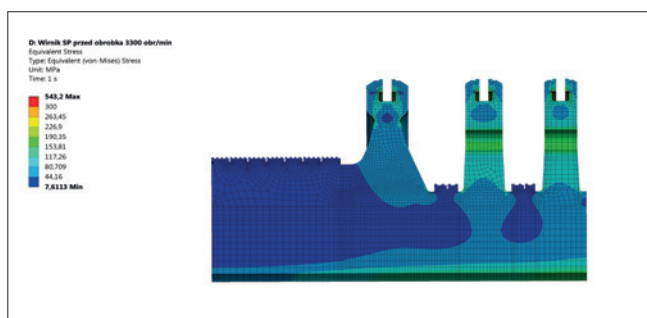


Rys. 18. Pęknięcie za pierwszym stopniem wirnika SP

W ramach remontu wskazanie obwodowe usunięto, a prace te poprzedzono analizą stanu naprężeń metodą elementów skończonych MES. Podczas obliczeń wariantowych analizowano, w jaki sposób korekta geometrii wpłynie na poziom naprężeń w tym przekroju.



Rys. 19. Rozkład naprężeń w wale wirnika dla 3000 obr./min

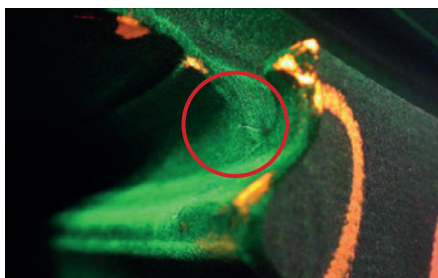
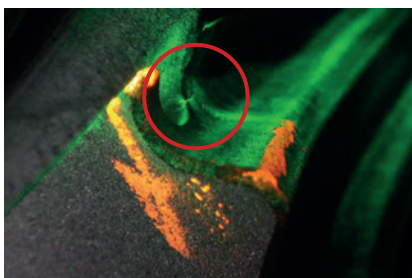


Rys. 20. Rozkład naprężeń w wale wirnika dla 3300 obr./min



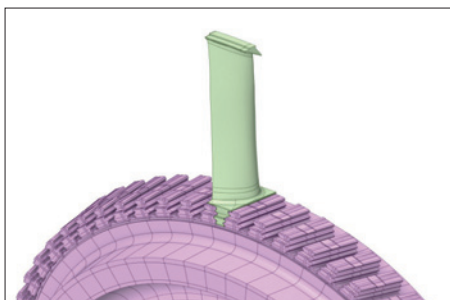
Rys. 21. Pęknięcia we wrębie trzeciego stopnia

Rys. 22. Pęknięcia we wrębie trzeciego stopnia

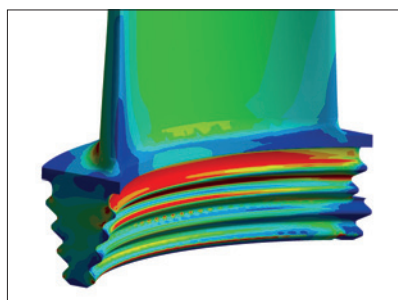


Rys. 23. Pęknięcia we wrębie czwartego stopnia

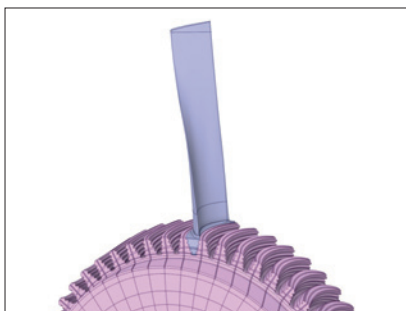
Rys. 24. Pęknięcia we wrębie czwartego stopnia



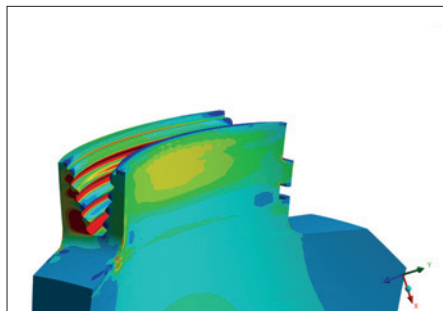
Rys. 25.



Rys. 26.



Rys. 27.



Rys. 28.

W trakcie badania wirnika NP stwierdzono:

- wskazania na trzecim stopniu – wał wirnika, strona SP i strona generatora:
 - pęknięcia od strony krawędzi wlotowej na wszystkich wrębach,
 - pęknięcia od strony krawędzi wylotowej na wszystkich wrębach.
- wskazania na czwartym stopniu – wał wirnika, strona SP i generatora:
 - pęknięcia od strony krawędzi wylotowej na wszystkich wrębach.

W ramach remontu wskazania na wrębach trzeciego i czwartego stopnia usunięto, a prace te poprzedzono analizą stanu naprężeń metodą elementów skończonych MES (rys. 25-28), aby ustalić, w jaki sposób korekta geometrii wpłynie na poziom naprężeń w tych wrębach.

Remont warsztatowy jako przykład współpracy ZRE Katowice i Pro Novum

Demontaż na obiekcie pokazano na rysunku 29, a montaż i pasowanie warsztatowe układów przepływowych części WP i SP turbiny 13K215 na rysunku 30.

Remont awaryjny turbiny 13K215 jako przykład współpracy ZRE Katowice i Pro Novum

Stan poawaryjny części SP turbiny typu 200 MW pokazano na rysunkach 31-34. Otwarcie części górnej kadłuba wewnętrznej części SP umożliwiło ocenę wizualną i ujawnienie uszkodzeń już na pierwszych stopniach, zarówno w obszarze wirnika jak i kierownic.

Rys. 29. Demontaż części WP

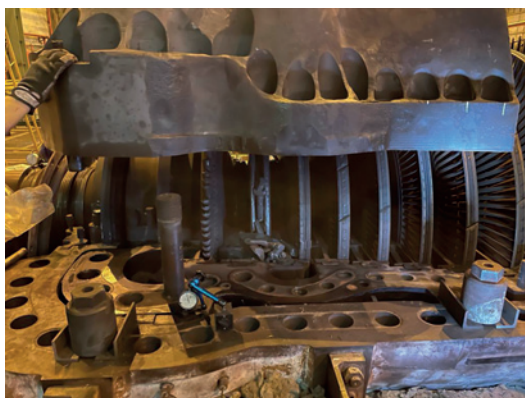


Rys. 30. Montaż części WP





Rys. 31.



Rys. 32.



Rys. 33.



Rys. 34.



Rys. 35.



Rys. 36.



Rys. 37.



Rys. 38.

Charakter uszkodzeń:

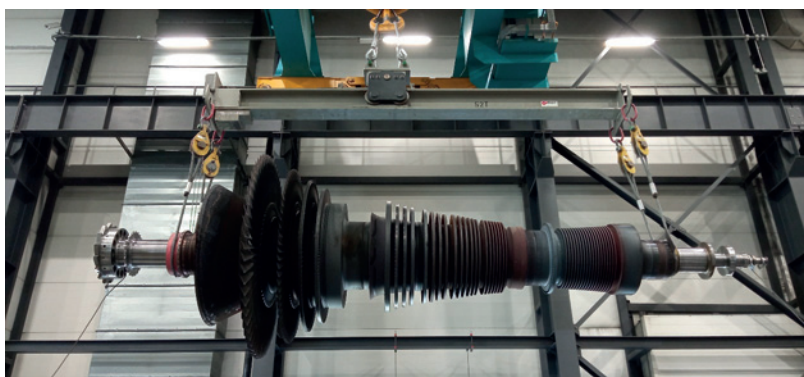
- oderwanie bandaża zewnętrznego stopnia A1 wirnika na całym obwodzie,
- częściowe i całkowite oderwanie piór od stopek łopatek stopnia A1,
- rozerwanie wrębu stopnia A2 wirnika,
- uwolnienie 100% łopatek ze stopnia A2 wirnika,
- deformacje, rozerwanie krawędzi piór łopatek kolejnych stopni.

Uszkodzenia tarcz kierowniczych części SP i uszkodzenia w obszarze kanałów parowych i ołpatkowania tarcz kierowniczych pokazano na rysunkach 35-38.

Remont kapitalny *SIEMENS EHNK90/5,0* jako przykład współpracy ZRE Katowice i Pro Novum



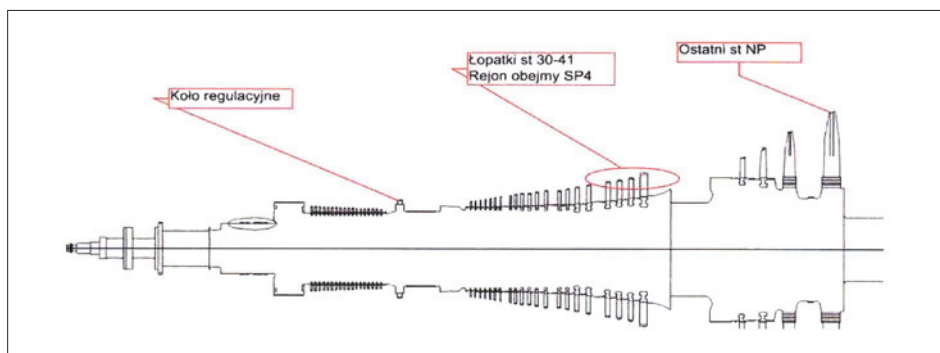
Rys. 39.



Rys. 40.



Rys. 41.



Rys. 42.



Rys. 43.



Rys. 44.



Rys. 45.

Podsumowanie i wnioski

- W przeszłości docierały do nas informacje, że turbiny nie wymagają zaawansowanych technicznie remontów, może nawet do końca ich resursu.
- Nasze oraz użytkowników turbin doświadczenia wskazują, że były to opinie błędne.
- Możliwe, także że osoby je wygaszające nie znają z autopsji skutków awarii turbin, albo ich niechęć do planowania i wykonywania remontów turbin wynika z zauważalnego spadku jakości tych remontów. Bywa, że po remoncie turbina jest w gorszym stanie technicznym niż przed jego wykonaniem. Dlatego tak ważne jest, aby remont swoich urządzeń Inwestorzy powierzali firmom doświadczonym, z kompletnym zapleczem technologicznym i dużym potencjałem – z całą pewnością *ZRE Katowice SA* spełnia takie wymogi.
- W naszej opinii tylko remont wykonany z wykorzystaniem dobrych praktyk inżynierskich wspieranych przez zaawansowaną diagnostykę gwarantuje Inwestorowi dobry stan techniczny urządzenia.
- Diagnostyka, w kontekście remontu turbiny, ma znaczenie:
 - a) przed remontem – ostatnia ocena i analiza historii i warunków pracy w okresie między remontami (oraz zdalna diagnostyka jeśli taka została wdrożona),
 - b) podczas remontu – w celu weryfikacji koniecznych do wykonania napraw, rewitalizacji, regeneracji, wymian oraz modernizacji,
 - c) po remoncie – w celu analizy warunków uruchomienia (zwłaszcza gdy było ich więcej niż jeden oraz zidentyfikowano nieprawidłowości),
 - d) w okresie gwarancji – wychodząc naprzeciw oczekiwaniom naszych klientów oraz mając na uwadze własny interes, uważamy, że turbina powinna być objęta nadzorem diagnostycznym niezależnym od użytkownika, oczywiście z możliwością korzystania z jego rezultatów.
- Turbiny typu 200 MW (czy też o mocach mniejszych) bezwzględnie wymagają kompetentnego nadzoru eksploatacyjnego, nowoczesnej diagnostyki remontowej i eksploatacyjnej oraz zaawansowanych technicznie remontów w celu dalszej bezpiecznej eksploatacji.

- Najniższa cena – jako jedyne kryterium kwalifikacji firmy remontowej jest często ograniczeniem dla profesjonalnej i kompleksowej diagnostyki remontowej, czego efektem jest spadek jakości wykonywanych napraw, a w konsekwencji wzrost awaryjności – zniechęcający do planowania kolejnych remontów.
- Konieczne jest opracowanie indywidualnych planów remontów dla eksploatowanych urządzeń, bazujących na:
 - a) kompleksowej wiedzy o aktualnym stanie eksploatowanych urządzeń opartej na rzetelnych badaniach diagnostycznych i profesjonalnej ocenie stanu technicznego w trakcie przeglądów technicznych i prac remontowych,
 - b) analizie parametrów eksploatacyjnych i ustaleniu harmonogramu remontów z uwzględnieniem różnic w zakresie prognozowanego a rzeczywistego reżimu pracy,
 - c) nowych narzędziach pozwalających na zdalne monitorowanie i analizę parametrów pracy miejsc krytycznych w celu aktualizacji oceny stanu technicznego oraz weryfikacji prognozy trwałości i zaleceń eksploatacyjnych,
- Uszkodzenia kluczowych komponentów, takich jak wirniki, tarcze kierownicze, łożyska, wymagają nie tylko napraw, ale i fachowej oceny stanu technicznego. Jedynie połączenie wyspecjalizowanej diagnostyki oraz zaawansowanych technicznie i sprawdzonych w praktyce – technologii remontowych z wykorzystaniem odpowiedniego parku maszynowego zapewnia oczekiwaną staranność i precyzję napraw, gwarantując właściwą ich jakość, a tym samym bezpieczeństwo dalszej eksploatacji.
- Jedynie połączenie kompetentnej firmy diagnostycznej z profesjonalną firmą remontową z dużym doświadczeniem kadry inżynierjno-technicznej pozwala na dobór właściwej technologii naprawy (zarówno pod względem technicznym jak i ekonomicznym), gwarantującej uzyskanie odpowiednich parametrów remontowanych podzespołów i bezpieczeństwo dalszej eksploatacji urządzeń.

Dlatego tak ważne jest, aby remont urządzeń Inwestorzy powierzali firmom z wieloletnim doświadczeniem, z kompletnym zapleczem technologicznym i dużym doświadczeniem i potencjałem, takim jak: *Pro Novum* i *ZRE Katowice SA*.

Rurociągi wody zasilającej – brzydkie kaczątko energetyki konwencjonalnej

Feedwater pipelines – an ugly duckling of conventional energy

Rurociągi wody zasilającej bloku energetycznego generatora dzielą się na dwie części funkcjonalne: część ssącą i część tłoczną. Rurociągi mimo wielokrotnych postulatów nie są objęte dozorem technicznym UDT, chociaż są najbardziej niebezpiecznym urządzeniem w całym bloku energetycznym. Awaria, zwłaszcza części tłocznej, to katastrofa w skali całej elektrowni (elektrociepłowni) bardziej tragiczna w skutkach od eksplozji wodoru chłodzącego generatora, bo to dotyczy tylko jednego bloku, czasem przyległych, a nie całej maszynowni. W referacie omówiono typowe konstrukcje rurociągów i wynikające stąd zagrożenia, zarówno pochodzenia konstrukcyjno-projektowego, jak i eksploatacyjnego. Przedstawiono, w oparciu o wieloletnie doświadczenia *Pro Novum*, podstawowe zalecenia diagnostyczne z odniesieniem do rodzajów badań nieniszczących. Opisano najczęściej stosowane systemy zamocowań, ich wady i zalety. W podsumowaniu zaprezentowano program diagnostyki rurociągów wody zasilającej bloku energetycznego opracowanej i stosowanej w *Pro Novum*.

Słowa kluczowe: rurociągi wody zasilającej, diagnostyka, zagrożenia konstrukcyjno-projektowe i eksploatacyjne

The feedwater pipelines of the power unit are divided into two functional parts: the suction part and the discharge part. Pipelines, despite multiple demands, are not covered by the technical supervision of the Office of Technical Inspection, although they are the most dangerous device in the entire power unit. Failure, especially in the pressure part, is a disaster on the scale of the entire power plant (heat and power plant and power plant), more tragic in consequences than the explosion of hydrogen cooling the generator, because it concerns only one unit, sometimes adjacent, and not the entire engine room. The paper discusses typical pipeline structures and the resulting risks, both of design and operational origin. Based on many years of *Pro Novum* experience, basic diagnostic recommendations are presented with reference to the types of non-destructive testing. The most commonly used fixing systems are described, along with their advantages and disadvantages. The summary presents the power unit feedwater pipeline diagnostics program developed and used in *Pro Novum*.

Keywords: feedwater pipelines of the power unit, diagnostic, design and operational risk

Wstęp

W artykule omówiono funkcję, jaką pełni rurociąg wody zasilającej w bloku energetycznym, sposób realizowania tej funkcji oraz zagrożenia, jakie mogą występować w trakcie jej realizacji, czyli w czasie eksploatacji rurociągów. Rurociągi wody zasilającej nie są objęte nadzorem Urzędu Dozoru Technicznego i przez ten fakt są najczęściej pomijane w regularnych badaniach diagnostycznych.

Konstrukcje rurociągów wody zasilającej

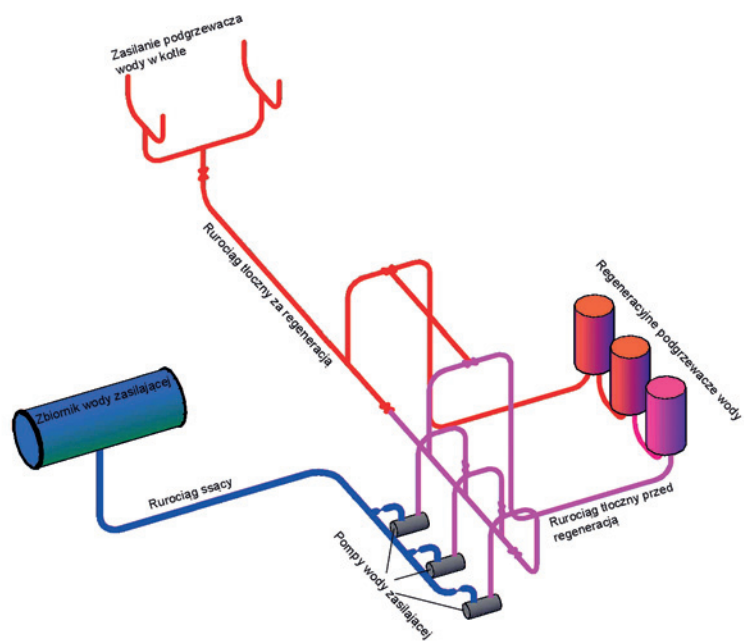
Zadaniem rurociągów wody zasilającej jest stałe dostarczenie wody kotłowej ze zbiorników do podgrzewaczy wody w kotle. Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony schemat rurociągów wody zasilającej bloku klasy 200 MW. Rurociągi ze względu na parametry dzielimy na ssące i tłoczne.

Część ssąca to zwykle wiotka rura, która łączy zbiornik wody zasilającej i pompy zasilające. Wykonana jest zwykle z podstawowych stali konstrukcyjnych o grubości ok. 8 mm.

Część tłoczna natomiast to rurociągi o grubościach przeważnie powyżej 20 mm (wykonane ze stali jakościowych), które nad pompami rozpoczynają się kłapami zwrotnymi dość długą kompensacją.

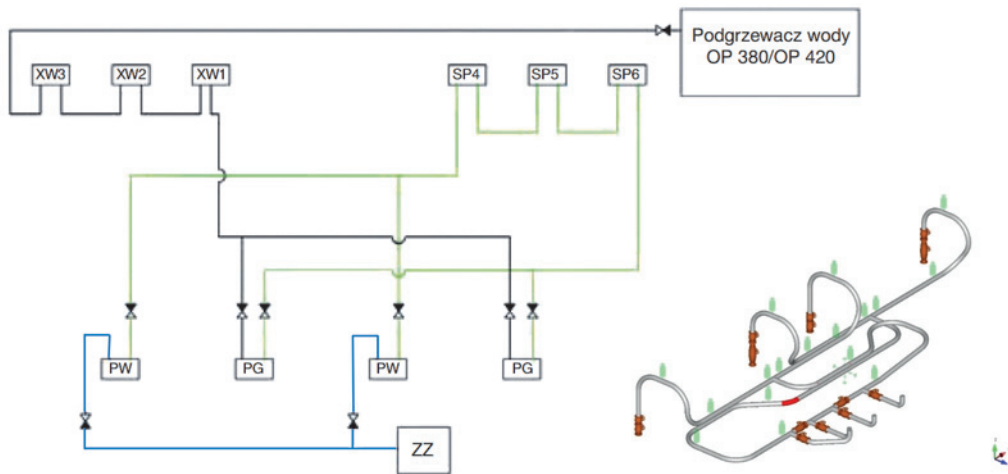
Rurociągi te ze względu na parametry pracy podzielić można na trzy segmenty:

- za pompami tłocznymi,
- w obrębie przegrzewaczy regeneracyjnych,
- za przegrzewaczami regeneracyjnymi.



Rys. 1. Uproszczony schemat rurociągów ssących i tłocznych wody zasilającej bloku klasy 200 MW

kolor niebieski – część ssąca, kolor fioletowy – część tłoczna niskotemperaturowa, kolor czerwony – część tłoczna wysokotemperaturowa



Rys. 2. Schemat funkcyjny rurociągów wody zasilającej bloku klasy 120 MW

kolor niebieski – część ssąca, kolor zielony – część średnioprężna, kolor czarny – część wysokoprężna, PW – pompy wstępne, PG – pompy główne, SP i XW – podgrzewacze regeneracyjne

Na rysunku 2 przedstawiono schemat jednego z możliwych układów rurociągów wody zasilającej starszych bloków klasy 120 MW. Ze względu na ówczesne możliwości pomp wody zasilającej w ich układzie wyróżnić można by rurociągi średnioprężne, umieszczone pomiędzy pompami wstępnymi i i głównymi. Rurociągi te posiadały w swoim układzie podgrzewacze regeneracyjne średnioprężne i wysokoprężne.

Parametry pracy i stosowane materiały

Jeśli mowa o wodzie zasilającej, to mamy na myśli wodę przegrzaną. W części ssącej mamy najczęściej do czynienia z temperaturami mniejszymi od 160°C i ciśnieniem poniżej 0,8 MPa. Po stronie tłocznej ciśnienie wynosi przeważnie pomiędzy 15 a 23 MPa, a temperatura wody za podgrzewaczami regeneracyjnymi osiąga 250°C. Rurociągi ssące wykonane są najczęściej ze zwykłych stali węglowych (K10, K18), natomiast rurociągi tłoczne ze stali jakościowych (19G3, P265GH itp.) lub znacznie rzadziej niskostopowych (16M, 16Mo3 itp.).

Generalne założenia projektowe

Projektanci rurociągów powinni brać pod uwagę znacznie większy ciężar medium w stosunku do rurociągów parowych, znaczne przemieszczenia komór wlotowych

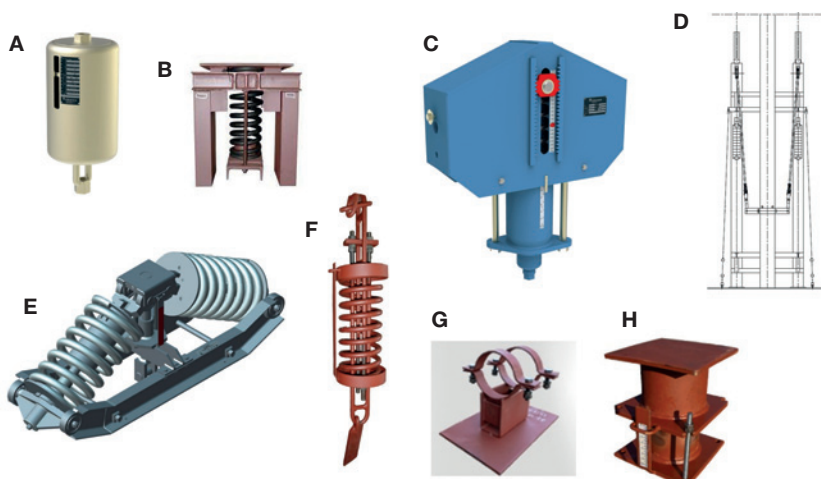
podgrzewacza wody przy niewielkich zmianach geometrii samego rurociągu, ze względu na temperatury pracy oraz dopuszczalne siły i momenty na króćcach pomp zasilających itp.

Dobór zamocowań rurociągów ma bardzo duży wpływ na ich bezpieczną eksploatację ze względu na ciężar wody i wymuszony konstrukcją hal kotłowni i maszynowni rozstaw zamocowań (6 m ze względu na rozstaw słupów hal).

Rolą systemu zamocowań jest więc:

- uzyskanie wymaganego rozkładu naprężeń poprzez dobór odpowiedniej reakcji zamocowań na obciążenie pochodzące od grawitacji, ale również przemieszczenia cieplne rurociągów (mniejsze niż w przypadku rurociągów parowych, ale wciąż istotne),
- zachowanie odpowiednich sił i momentów sił na króćcach pomp zasilających, zbiorniku wody zasilającej czy komorach podgrzewacza w kotle.

Na rysunku 3 pokazano przykładowe, najczęściej występujące typy zamocowań, spotykane w konstrukcjach systemów zamocowań rurociągów wody zasilającej.



Rys. 3. Najczęściej występujące zamocowania rurociągów wody zasilającej
zestawy sprężynowe – A, F; stoły sprężynowe – B, H; zestawy statosiłowe – C, E; stałosiłowe zamocowanie wielokrzyżkowe – D; podparcie suwliwe (na rysunku poziome) – G

Zamocowania te można podzielić na grupy:

- punkty stałe – mające na celu odpowiednie ukierunkowanie przemieszczeń cieplnych;
- podparcia ślizgowe – stosowane w obszarach o najmniejszych przemieszczeniach cieplnych w rurociągu tłocznym, najczęściej w rejonie kolektora zbiorczo-dystrybucyjnego wody zasilającej z pomp do regeneracji;
- zawiesia i podparcia sprężynowe (również sprężynowo-ślizgowe) w rejonie małych przemieszczeń pionowych – stosowane najczęściej w rejonie podgrzewaczy regeneracyjnych i na głównej nitce rurociągu po stronie maszynowej;
- zamocowania sprężynowe o małej zmienności siły oraz zamocowania stałosiłowe – stosowane w celu kompensacji wymuszonych przez kołki przemieszczeń cieplnych rurociągów.

Najczęściej spotykane nieprawidłowości na rurociągach wody zasilającej oraz procesy niszczenia

Prawidłowa praca zamocowań to jedna z głównych gwarancji bezpiecznej pracy rurociągów. Wyjątkowo trudne warunki pracy powodują, że zamocowania ulegają różnego rodzaju uszkodzeniom. Przykłady uszkodzeń pokazano na rysunku 4.

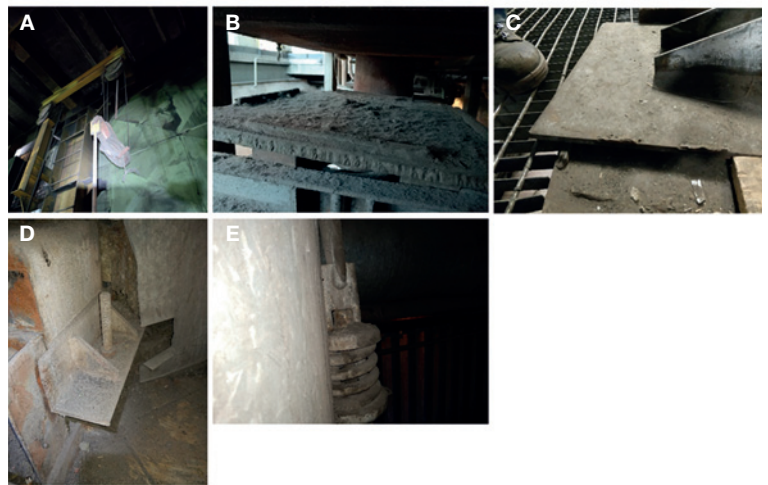
Najczęściej występującymi usterkami w systemie rurociągów wody zasilającej są różnego rodzaju blokady ich pracy spowodowane najczęściej: zacieraaniem się (stoły sprężynowe), niewłaściwym montażem (wykonanym często w ubiegłym tysiącleciu), brakiem usunięcia blokad remontowych, uszkodzeniami układów wielokrążkowych oraz brakiem elementów konstrukcyjnych zamocowań.

Należy pamiętać, że w systemie zamocowań sztywnych rurociągów tłocznych blokada jednego zamocowania rurociągu w jednym stanie potrafi doprowadzić do odciążenia tego zamocowania lub zamocowań sąsiednich w innym stanie pracy rurociągu, co powoduje znaczne wydłużenie odcinków niepodpartych.

Na rurociągach parowych niemal wszystkie nieprawidłowości związane z procesami niszczenia identyfikuje się na powierzchni zewnętrznej, oprócz zmęczenia cieplnomechanicznego, które występuje albo przy króćcach, albo na grubszych elementach – najczęściej odlewanych.

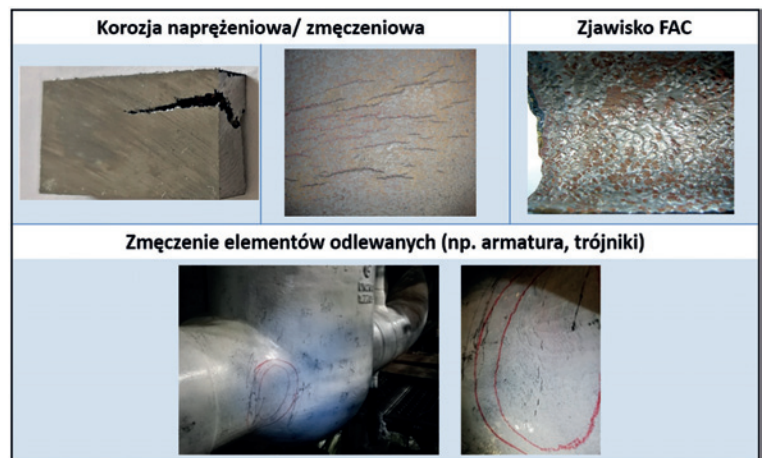
Jeśli chodzi o rurociąg wody zasilającej, to pierwsze oznaki zbliżającej się tragedii niemal zawsze pojawiają się w środku rurociągu.

Procesami niszczenia (rys. 5) materiałów rurociągów są najczęściej procesy związane z korozją propagowaną zjawiskami fizycznymi, takimi jak naprężenia (w tym naprężenia zmienne) oraz zaburzenia przepływu. Bardzo częstym procesem niszczenia, podobnie jak na rurociągach parowych, jest zmęczenie mechaniczne elementów odlewanych (trójniki, czwórniki, armatura).

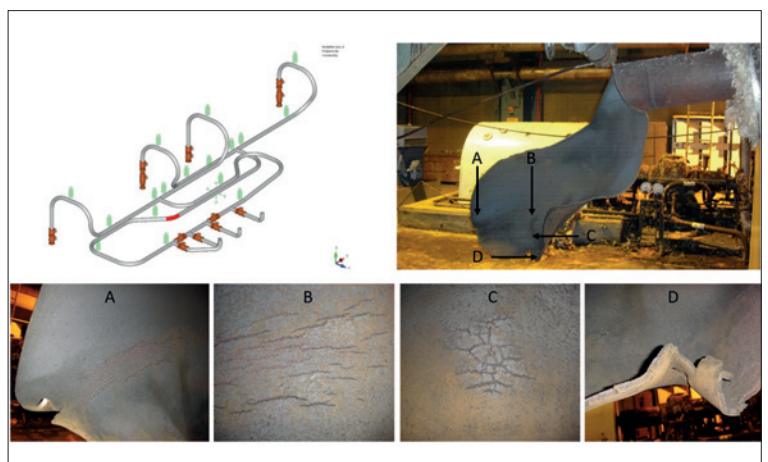


Rys. 4. Najczęściej występujące uszkodzenia zamocowań

- A – uszkodzony zestaw wielokrążkowy,
- B – zablokowany stół sprężynowy i brak zestawu kul,
- C – uszkodzona podpora suwliwa – brak kół oraz ograniczników ich ruchu,
- D – zablokowany stół sprężynowy,
- E – niewłaściwie zamontowany wieszak sprężynowy



Rys. 5. Przykłady uszkodzeń wywołanych procesami niszczenia na rurociągach wody zasilającej



Rys. 6. Uszkodzenie eksplozyjne kolana średnioprężnego rurociągu wody zasilającej wywołane korozją naprężeniową

Bardzo niebezpiecznym zjawiskiem, który wywołał ostatnią, zidentyfikowaną w 2021 roku przez *Pro Novum*, awarię kolektora wody zasilającej było rozszczelnienie rurociągu spowodowane korozją naprężeniową w strefie obojętnej łuku kolana. Rurociąg, na którym wystąpiła awaria nigdy nie był poddawany badaniom diagnostycznym. Podobna sytuacja dotyczyła rurociągu średnioprężnego na bloku klasy 120 MW na przełomie lat 2010-2011, kiedy to z tego samego powodu nastąpiło rozerwanie kolana (rys. 6), czego następstwem było całkowite wypełnienie hali maszynowni mokrą parą wodną.

W odpowiednich warunkach fizykochemicznych w rejonie elementów zaburzających przepływ czynnika może zachodzić pocienienie grubości ścianki i nie jest to erozja, lecz proces korozyjny, polegający na zabieraniu tlenu żelaza – magetytu przez strumień cieczy i następnie dyfuzyjny proces niszczenia żelaza. Proces ten wywołał bardzo poważną awarię w japońskiej elektrowni atomowej.

Badania diagnostyczne rurociągów

Ponad 35-letnie doświadczenie *Pro Novum* upoważnia do stwierdzenia, że kluczowe dla bezpiecznej pracy rurociągów są okresowe kontrole systemu zamocowań i badania NDT trasy rurociągu. W tabeli 1 w sposób syntetyczny pokazano zalecane obszary badań i ich zakres.

Tabela 1

Proponowany zakres i lokalizacja badań elementów rurociągów wody zasilającej

Element	Metoda badań	Obszar
Zamocowania	wizualne	konstrukcja zamocowań
Kolana	magnetyczno-proszkowe	strefa rozciągana
	pomiar grubości	min. 4 punkty po obwodzie w pięciu płaszczyznach
		siatka na całym obwodzie kolana w przypadku stwierdzenia pocienień
	pomiary średnic w celu wyznaczenia owalizacji	w pięciu płaszczyznach pomiędzy strefami rozciąganą i ścisną oraz strefami obojętnymi
	badania ultradźwiękowe	strefy obojętne kolana
badania endoskopowe	100% powierzchni wewnętrznej	
Armatura	magnetyczno-proszkowe	powierzchnia zewnętrzna i wewnętrzna korpusów
	badania endoskopowe	100% powierzchni wewnętrznej
	badania penetracyjne	powierzchnie uszczelniające (klina i siódła)
	sprawność działania klap zwrotnych	
Króćce	badania endoskopowe	100% powierzchni wewnętrznej
	magnetyczno-proszkowe	powierzchnia zewnętrzna wraz ze złączami spawanymi
Złącza spawane główne	magnetyczno-proszkowe	powierzchnia zewnętrzna wraz ze złączami spawanymi
	badania ultradźwiękowe	100% złącza (jeśli nie wykonywano wcześniej)

Systematyczne przeglądy i badania diagnostyczne rurociągów pozwalają na odpowiednio wczesne podjęcie prac zapobiegawczo-remontowych w celu uniknięcia awarii. Należy pamiętać, że ze względu na parametry wody przegrzanej rozszczelnienie części tłocznej rurociągu jest najbardziej niebezpieczną awarią w energetyce konwencjonalnej, bo najczęściej ma charakter eksplozyjny (gwałtowne odparowanie wody przegrzanej) niedający znajdującym się na hali zakładu szans na ratunek (z 1 litra wody przegrzanej w zależności od jej parametrów może powstać nawet blisko 2000 litrów pary mokrej, w której żywy organizm nie ma szans na przeżycie).

Przy planowaniu programu diagnostycznego rurociągów wody zasilającej szczególną uwagę należy zwrócić na badania geometrii kolana, czyli grubości ścianek i owalizacji oraz badania ich powierzchni wewnętrznej, poparte badaniami ultradźwiękowymi stref obojętnych łuków kolana.

Podsumowanie

1. Wysokoprężne rurociągi wody zasilającej nie są objęte nadzorem Urzędu Dozoru Technicznego mimo ciśnienia roboczego dochodzącego do 23 MPa.
2. Brak nadzoru przez Urząd Dozoru Technicznego u niektórych Użytkowników usypia czujność i o ile wykonuje się częste badania kotłów po stronie parowej oraz przeglądy i remonty pomp zasilających, jak również regeneracji, wpływające głównie na niezawodność bloku – zupełnie pomija się fakt, że istnieje pomiędzy tymi urządzeniami łącznik, który w głównej mierze wpływa na bezpieczeństwo.
3. Uszkodzenia rurociągów spowodowane czynnikami korozyjnymi akcelerowane są zwykle przez naprężenia stałe lub zmienne. Wywołane są one naprężeniami zewnętrznymi, np. stanem zamocowań oraz wewnętrznymi, np. niewłaściwą owalizacją kolana. Nie bez znaczenia pozostaje też fakt możliwości powstania korozji akcelerowanej przepływem, która jednak jest bardzo zależna od warunków fizykochemicznych czynnika (i rzadziej spotykana).
4. Obecność wad technologicznych rozwijających się zmęczeniowo w lanych elementach rurociągów bardzo często eliminuje je z dalszej pracy.
5. Rolą systemu zamocowań jest zapewnienie rurociągowi jak najmniejszych naprężeń pochodzących od grawitacji, kompensacji termicznej i przemieszczeń urządzeń, które łączy oraz zredukowanie oddziaływania rurociągu na te urządzenia.
6. Rozszczelnienie rurociągu tłoczego jest bardzo często procesem detonacyjnym, powodującym w najlepszym wypadku natychmiastowe odparowanie przegrzanej wody z całego rurociągu. W wyniku tego przestrzeń wypełnia się bardzo szybko mokrą parą.
7. Podane przypadki sugerują, że badania diagnostyczne rurociągów wysokoprężnych i średnioprężnych wody zasilającej należy wykonywać regularnie. Wyniki badań należy zawsze odnosić do badań poprzednich i taka analiza powinna prowadzić do określenia stanu technicznego rurociągów.

Nadzór diagnostyczny rurociągów parowych w trybie zdalnym w celu optymalizacji zakresów, terminów i kosztów badań

Diagnostic supervision of steam pipelines in the remote mode in order to optimize the scope, time and costs of diagnostics

Zapewnienie bezpieczeństwa instalacji rurociągowych pracujących w warunkach pełzania przy akceptowalnych kosztach powinno różnić dwie grupy instalacji istotnie się od siebie różniących: rurociągi długo eksploatowane oraz nowe, lub względnie nowe eksploatowane często przy wysokich, nadkrytycznych parametrach wykonanych ze stali oraz wg technologii co do których posiadamy mniej praktycznych doświadczeń. W referacie zaprezentowano podejście, które zdobywa sobie w ostatnim czasie coraz większą popularność zapewniające racjonalny konsensus pomiędzy kosztami badań a akceptowalnym poziomem minimalizacji ryzyk. Takim podejściem jest zdalny nadzór diagnostyczny, który integruje klasyczną diagnostykę i pomiary oraz bieżącą analizę historii i warunków pracy. W tym trybie można zarówno weryfikować prognozę trwałości, ale także aktualizować ocenę stanu technicznego wykorzystując modelowanie z wykorzystaniem AutoPipe lub w wersji najbardziej zaawansowanej korzystając z cyfrowych bliźniaków. W tej ostatniej, zaawansowanej wersji można, powinno wykonywać się, usługę w trybie LTSA zarówno dla instalacji nowych jak i długoeksploatowanych, wielokrotnie modernizowanych w celu przedłużenia eksploatacji lub/i zmiany jej warunków. W referacie przedstawiono przykłady różnych wersji zdalnej diagnostyki wdrożonych przez Pro Novum.

Słowa kluczowe: nadzór diagnostyczny, rurociągi parowe, zdalna diagnostyka

Ensuring the safety of pipeline installations operating in creep conditions at acceptable costs should distinguish two groups of installations significantly different from each other: long-operated pipelines and new or relatively new pipelines, often operated with high, supercritical parameters made of steel and according to technologies for which we have less practical experiences. The paper presents an approach that has recently been gaining more and more popularity, ensuring a rational consensus between diagnostics costs and an acceptable level of risk minimization. Such an approach is remote diagnostic supervision, which integrates classic as well as ongoing analysis of the history and working conditions. In this mode, you can both verify the lifetime forecast and update the assessment using AutoPipe modeling or, in the most advanced version, using digital twins. In the latter, advanced version, the service in the LTSA mode can and should be performed for both new and long-operated installations, repeatedly modernized in order to extend the operation and / or change its conditions. The paper presents examples of different versions of remote diagnostics implemented by Pro Novum.

Keywords: diagnostic supervision, stream pipelines, remote diagnostics

Wstęp

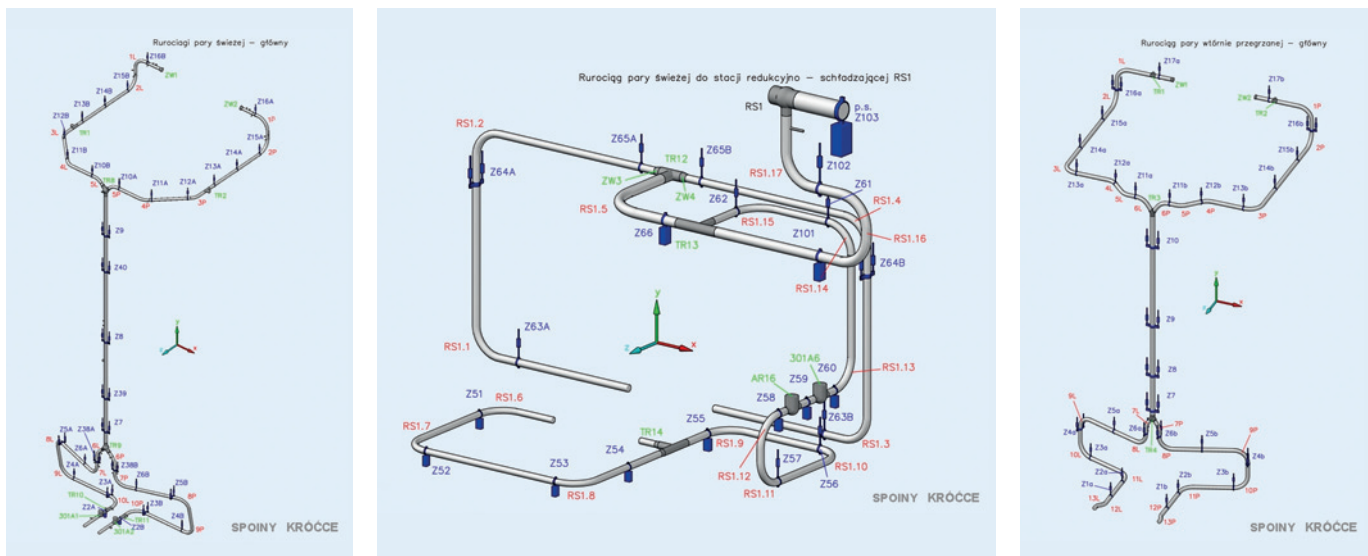
Zapewnienie bezpieczeństwa instalacji rurociągowych pracujących w warunkach pełzania przy akceptowalnych kosztach powinno różnić dwie grupy instalacji istotnie się od siebie różniących: rurociągi długo eksploatowane oraz rurociągi nowe lub względnie nowe, eksploatowane często przy wysokich, nadkrytycznych parametrach, wykonane z nowych gatunków stali oraz według technologii, co do których posiadamy mniej praktycznych doświadczeń.

W artykule zaprezentowano podejście, które zdobywa sobie w ostatnim czasie coraz większą popularność zapewniające racjonalny konsensus pomiędzy kosztami badań a akceptowalnym poziomem minimalizacji ryzyk. Takim podejściem jest zdalny nadzór diagnostyczny, który integruje klasyczną diagnostykę i pomiary oraz bieżącą analizę historii i warunków pracy. W tym trybie można zarówno weryfikować prognozę trwałości, jak i aktualizować ocenę stanu technicznego wykorzystując modelowanie z wykorzystaniem AutoPipe lub w wersji najbardziej zaawansowanej – korzystając z cyfrowych bliźniaków. W tej ostatniej, zaawansowanej wersji można (powinno się) wykonywać usługę w trybie LTSA, zarówno dla instalacji nowych jak i długo eksploatowanych, wielokrotnie modernizowanych w celu przedłużenia eksploatacji lub/i zmiany jej warunków.

Diagnostyka jako źródło wiedzy o stanie technicznym rurociągów parowych

Przestrzenne układy rurociągów parowych w energetyce można podzielić na: klasyczne, jakie znamy z bloków 100–360 MW, a nawet 500 MW, projektowane ze swobodną kompensacją najczęściej w układach symetrycznych lub quasi-symetrycznych kotła z turbiną, układy kolektorowe oraz nowoczesne, często nadkrytyczne układy blokowe. W czasie projektowania wymienionych rurociągów przyjmowano zupełnie inne założenia konstrukcyjne dotyczące typów oraz konstrukcji zamocowań, długości odcinków kompensacyjnych, materiałów w celu minimalizacji masy rurociągów oraz dostosowania tych rurociągów do innych parametrów pracy.

Rurociągi parowe podzielić można na takie, które projektowane były do pracy powyżej temperatury granicznej, np. rurociągi pary świeżej i wtórnie przegrzanej, oraz rurociągi pracujące poniżej temperatury granicznej, np. rurociągi pary do wtórnego przegrzewu oraz część rurociągów komunikacyjnych kotła. Praktyka pokazuje jednak, że na niektórych instalacjach zdarzają się odcinki rurociągów nigdy niepracujące w zakładanych parametrach pracy lub pracujące w nich okresowo. Czasowe lub całkowite obniżenie parametrów pracy



Rys. 1. Obliczenia głównych rurociągów parowych

(najczęściej temperatury i przepływu) w teorii nie powinno mieć negatywnych skutków na trwałość tych urządzeń. Doświadczenia pokazują jednak, że na takich instalacjach występują zupełnie inne procesy niszczenia.

Obliczenia kompensacyjne w czasie projektowania rurociągów wykonuje się dla parametrów obliczeniowych dla rurociągów pracujących powyżej temperatury granicznej. Jako wartości dopuszczalne przyjmuje się wartości wytrzymałości czasowej w danej temperaturze, a dla rurociągów pracujących poniżej temperatury granicznej – temperaturą granicę plastyczności. Obliczenia kompensacyjne wykonywane np. za pomocą oprogramowania Bentley AutoPIPE dają ogólny pogląd, jakie naprężenia i przemieszczenia występować będą w instalacji przy założeniu, że dane elementy spełniają będą minimum wymagań zaimplementowanych norm i specyfikacji – rysunek 1.

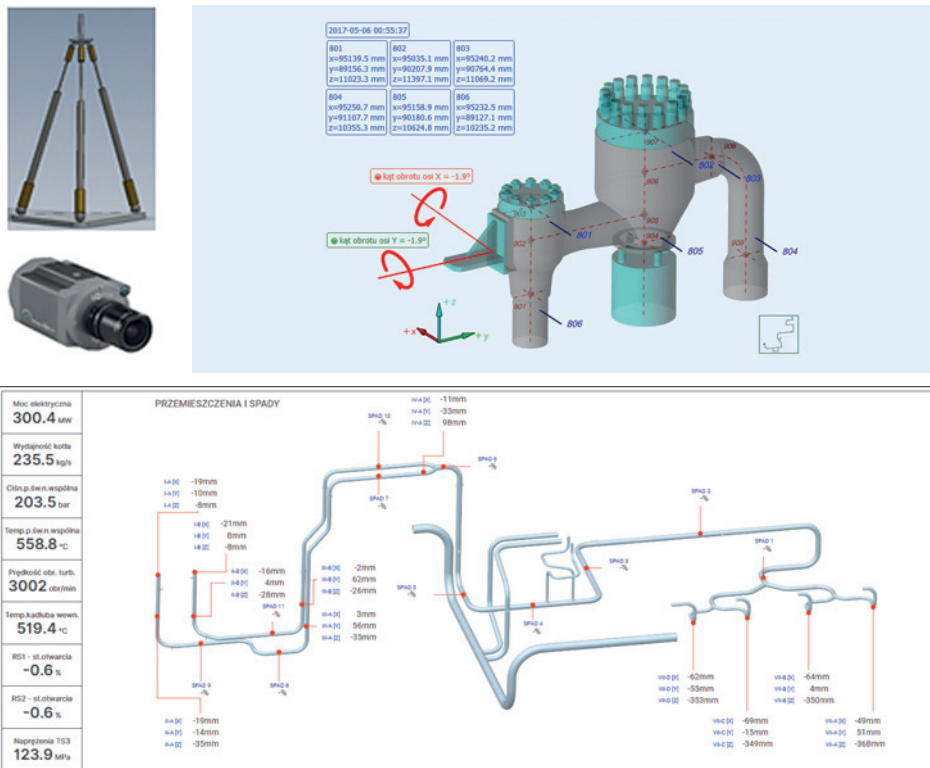
Takie uproszczenia oraz doświadczenie inżynierskie są wystarczające na etapie projektowania danego układu rurociągów. Używanie tego typu narzędzi do planowania diagnostyki i do jej weryfikacji może być i najczęściej jest obciążone błędem. Jego źródłem jest nieuwzględnianie w obliczeniach rzeczywistej geometrii poszczególnych elementów oraz rzeczywistej charakterystyki zamocowań. Na szczęście jest sposób na weryfikację wyników obliczeń kompensacyjnych na podstawie rzeczywistych przemieszczeń cieplnych rurociągów. Weryfikacja taka nie prowadzi jednak do uzyskania prawidłowych wyników z obliczeń konstrukcyjnych prowadzonych w niededykowanym do diagnostyki rurociągów oprogramowaniu, a jedynie do upewnienia się czy i jak bardzo model obliczeniowy różni się od obiektu rzeczywistego. Niemal zawsze można obliczeniowe przemieszczenia zbliżyć do przemieszczeń rzeczywistych stosując różne praktyki, takie jak np. blokady w określonych osiach, zmiana współczynników tarcia czy mas poszczególnych elementów. Należy pamiętać, że po takich czynnościach określony rozkład naprężeń na modelu staje się jeszcze mniej pewny niż przed ich zastosowaniem, ponieważ takie wymuszacze przemieszczeń nie występują w obiekcie rzeczywistym.

Z obserwacji *Pro Novum* i próśb klientów dotyczących optymalizacji badań diagnostycznych w celu minimalizacji ich kosztów wynika, że powinna ona odbywać się na podstawie analizy obliczeń konstrukcyjnych w oprogramowaniu Bentley AutoPIPE lub podobnym, spełniającym te same kryteria. Jednak ze względu na opisywane wcześniej argumenty podejście takie nie zawsze jest właściwe, tym bardziej że inwentaryzacja trasy rurociągu odbywała się kilka lat wstecz, a użytkownik nie posiada wystarczającej bazy pomiarów rzeczywistych pracy (np. temperatury metalu, przemieszczeń) z niewralgicznych miejsc – rysunek 2.

W czasie budowy nowych rurociągów, kiedy już rzeczywiste elementy są montowane zaleca się, aby wykonać ich możliwie dokładne modele geometryczne oraz odpowiednio udokumentować świadectwa odbioru wraz z wynikami badań poszczególnych elementów. W trakcie eksploatacji rurociągów już istniejących, zgodnie z Wytycznymi *Pro Novum* oraz Urzędu Dozoru technicznego, musi dojść do momentu, w którym wykonuje się ich kompleksową diagnostykę. Zalecamy, aby diagnostykę tę już stosunkowo niewielkim kosztem rozszerzyć o wykonanie jak najdokładniejszego modelu geometrycznego rurociągu (oraz jego elementów), jak również wykonać badania niszczące w reprezentatywnych miejscach w celu wykonania modelu obliczeniowego rurociągu, który będzie odpowiadał rzeczywistemu rurociągowi w możliwie jak największym zakresie.

Model obliczeniowy odzwierciedlający rzeczywisty obiekt oraz rzeczywiste warunki pracy da specjalistom lub algorytmowi możliwość znacznego ograniczenia zakresu badań, a takie podejście można poprzeć pewnymi dowodami. Model taki obciążony rzeczywistymi historycznymi parametrami pracy pozwoli na identyfikację procesów niszczenia, a zatem na dobór odpowiednich metod badawczych. Takie podejście to już pierwszy krok do stworzenia rzeczywistego, cyfrowego bliźniaka rurociągu.

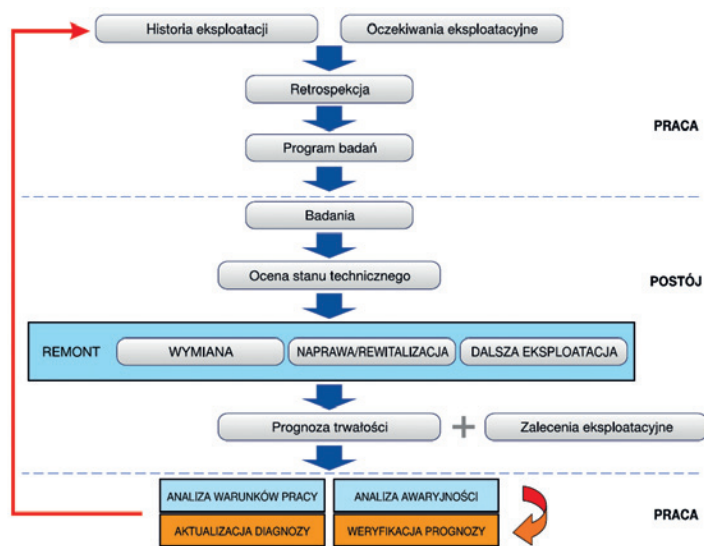
W celu zaspokajania nowych potrzeb Klientów oraz podlegających ciągłej ewolucji ich oczekiwań, w kolejnych wersjach platformy informatycznej **LM System PRO+®** wykorzystujemy zaawansowane technologie informatyczne, które poszerzają możliwości analityczne Systemu.



Rys. 2. Dedykowane układy kontrolno-rejestrujące oraz ich wizualizacje

Diagnostyka zdalna

Istotą zdalnej diagnostyki rurociągów realizowanej na różnych obiektach energetycznych był wybór parametrów pracy i powiązanie ich z warunkami pracy istotnie wpływającymi na stan techniczny poszczególnych elementów oraz całej konstrukcji. W dalszej kolejności opracowano algorytmy przetwarzania informacji rejestrowanych przez system w celu tworzenia wiedzy diagnostycznej. Posiadając aktualną wiedzę o stanie technicznym (wyniki badań) rurociągów oraz informacje remontowe doprowadzono do synchronizacji dwóch procesów: badań diagnostycznych i eksploatacji (ciągłych pomiarów wybranych parametrów pracy) – rysunek 3.



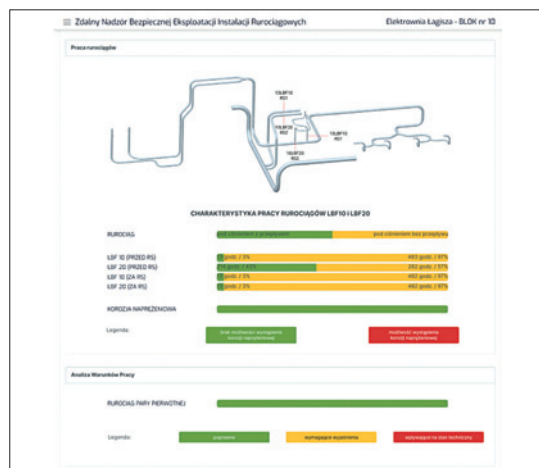
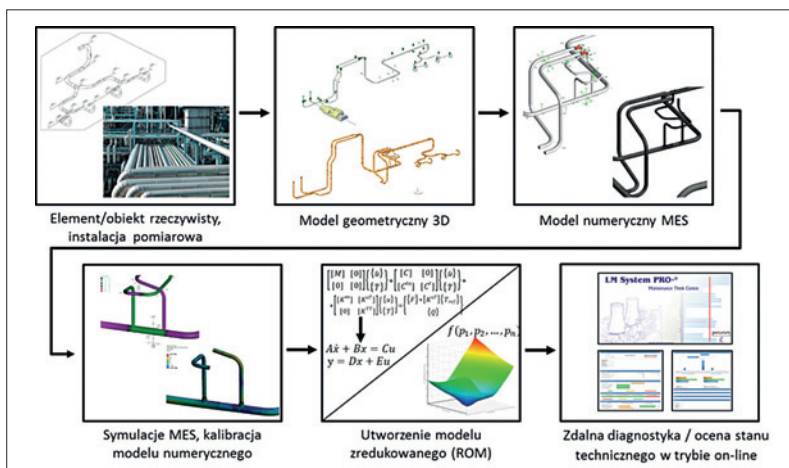
Rys. 3. Diagnostyka jako proces zintegrowany z procesem eksploatacji urządzeń

Zsynchronizowanie wymienionych procesów przeprowadzono w sposób pozwalający na wykrycie i przeanalizowanie w trybie on line każdego, istotnego dla potencjalnego ubytku trwałości „zdarzenia eksploatacyjnego”. W przypadku zdalnej oceny stanu technicznego rurociągów analizowanie cieplno-mechanicznych warunków pracy było niewystarczające do stworzenia pełnego obrazu stanu technicznego/rozwiązania problemu eksploatacyjnego.

Bardzo istotnym elementem wpływającym na stan techniczny rurociągów parowych, który uwzględniliśmy rozwijając system, oprócz stanu metalu jego elementów i pracy jego zamocowań, jest analiza przemieszczeń cieplnych. Postanowiliśmy stworzyć narzędzie, które umożliwia zdalne monitorowanie rzeczywistych przemieszczeń cieplnych i ich analizę. Początkowo rozwiązanie to zostało oparte na fotogrametrii, jednak po kilku latach doświadczeń, tam gdzie jest to konieczne, stosowane są układy hybrydowe składające się dodatkowo z systemu wykorzystującego czujniki przemieszczeń liniowych.

Diagnostyka zaawansowana – nowoczesne technologie informatyczne

Koncepcja Zdalnego Nadzoru Diagnostycznego Rurociągów polega na integracji klasycznej, zaawansowanej wiedzy na temat eksploatacji i diagnozowania parowych instalacji rurociągowych oraz współczesnych technologii modelowania numerycznego konstrukcji i procesów wymiany ciepła, generowania naprężeń, przemieszczeń i utraty trwałości.



Rys. 4. Proces realizacji cyfrowego bliźniaka wykorzystany w zdalnej diagnostyce

Rys. 5. Przykładowy interfejs aplikacji do zdalnego nadzoru rurociągów parowych

Wykorzystujemy technologię Digital Twins do modelowania wybranych elementów rurociągów oraz zaawansowane metody analityczne do analizy warunków pracy, identyfikowania procesów degradacji własności i wyczerpania trwałości – rysunek 4.

Wybrane metody AI, zwłaszcza Deep Mining i Machine Learning, wykorzystuje się do optymalizacji metodyki oceny stanu technicznego, z uwzględnieniem specyfiki pracy poszczególnych odcinków rurociągów, jak również do kreowania maszynowych kompetencji w miarę czasu eksploatacji instalacji oraz nadzorowania coraz większej ich liczby.

Powstały System w formie zdalnego nadzoru można elastycznie konfigurować, wyposażony jest w zestaw nowych, zaawansowanych funkcji, bardziej ergonomiczny interfejs użytkownika oraz zoptymalizowane algorytmy przetwarzania danych.

Głównymi funkcjonalnościami systemu zdalnej diagnostyki rurociągów parowych (rys. 5) są:

- monitorowanie istotnych, z punktu widzenia trwałości (żywności) elementów krytycznych, parametrów pracy;
- monitorowanie zachowania się całej konstrukcji, pośrednio także stanu zamocowań rurociągów;
- rejestracja czasu pracy rurociągów, w tym czasu pracy „pod ciśnieniem – bez przepływu” odgałęzień rurociągów głównych;
- identyfikacja stanów pracy bloku;
- wykrywanie stanów awaryjnych, np. w postaci tzw. uderzeń hydraulicznych;
- rejestracja zdarzeń awaryjnych;
- ocena wpływu pracy regulacyjnej na stan techniczny elementów rurociągu;
- automatyczne dokumentowanie historii eksploatacji;
- ocena aktualnego stanu technicznego rurociągów;
- monitorowanie online stanu naprężeń;
- bieżąca aktualizacja Stopnia Wyczerpania Trwałości;
- rozwiązywanie indywidualnych problemów, np. poprawności regulacji zamocowań itp.

Podsumowanie

Opracowany przez Pro Novum System Zdalnego Nadzoru Diagnostycznego Rurociągów Parowych może być stosowany zarówno dla nowo oddanych jak i długo eksploatowanych rurociągów i może być narzędziem do zdobywania korporacyjnej wiedzy technicznej.

Głównymi korzyściami z wdrożenia zdalnego nadzoru diagnostycznego mogą być:

- znaczące ograniczenie obsługi nad nadzorem stanu technicznego rurociągów,
- automatyczne generowanie raportów okresowych ze wsparciem eksperckim Pro Novum,
- spełnienie przepisów Urzędu Dozoru Technicznego,
- spełnienie wymagań „Wytycznych przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 200 MW” Pro Novum [4],
- niskie koszty nadzoru diagnostycznego przy zachowaniu najwyższych standardów technicznych,
- optymalizacja czynności remontowych w sposób adekwatny do stanu technicznego monitorowanych rurociągów.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Brunné W., Trzeczcyński J., Haliński J., *Zdalna diagnostyka głównych rurociągów parowych bloków energetycznych*. „Dozór Techniczny” 2011, nr 6.
- [2] Trzeczcyński J., Hattas M., Murzynowski W., *Digitalizacja środowiska diagnostycznego jako proces wspierający bezpieczeństwo dyspozycyjność bloków energetycznych oraz możliwość poprawy ich elastyczności w niskonakładowy sposób*. „Nowa Energia” 2022, nr 2.
- [3] 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.
- [4] 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, 2013.

II/XXIV Sympozjum DIAGNOSTYKA URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH I INSTALACJI PRZEMYSŁOWYCH

Bezpieczeństwo i dyspozycyjność bloków i urządzeń energetycznych w okresie transformacji polskiej elektroenergetyki (I)

W dniach 6-7 października 2022 r. odbyło się zorganizowane przez *Przedsiębiorstwo Usług Naukowo-Technicznych „Pro Novum” sp. z o.o.* II/XXIV Sympozjum **DIAGNOSTYKA URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH I INSTALACJI PRZEMYSŁOWYCH**, którego tematem przewodnim było **Bezpieczeństwo i dyspozycyjność bloków i urządzeń energetycznych w okresie transformacji polskiej elektroenergetyki (I)**.

Po zeszłorocznej edycji zdalnej Sympozjum w tym roku powróciło do formuły całkowicie stacjonarnej – Sympozjum odbyło się w Hotelu *Diament* w Ustroniu.

Patronat Honorowy nad Sympozjum sprawowały: Towarzystwo Gospodarcze Polskie Elektrownie, Izba Gospodarcza Energetyki i Ochrony Środowiska oraz Business Centre Club.

Z kolei patronami merytorycznymi wydarzenia zostali: *ENEA Elektrownia Połaniec SA*, *PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA*, *TAURON Wytwarzanie SA* i *Veolia Energia Poznań SA*. Strategicznym Partnerem Technologicznym Sympozjum został *ORLEN Serwis SA*.

Wszystkie najważniejsze czasopisma branżowe objęły Sympozjum patronatem merytorycznym, a były to: *Dozór Techniczny*, *Energetyka*, *Nowa Energia* i *Śląskie Wiadomości Elektryczne* oraz portal *Cire.pl*. W tym roku po raz pierwszy patronatem medialnym objął Sympozjum również miesięcznik *INSTAL*.

Otwarcia Sympozjum dokonała Ewa Trzeczyska – prokurent i zastępca dyrektora ds. administracyjnych i finansowych w *Pro Novum sp. z o.o.*, która przedstawiła partnerów Sympozjum, jego tematykę i program tegorocznego wydarzenia. Następnie powitalne adresy do uczestników skierowali członkowie Komitetu Honorowego i przedstawiciele partnerów Sympozjum, którzy podkreślali rolę Sympozjów *Pro Novum* dla branży i znaczenie technicznych, inżynierskich dyskusji w obecnej sytuacji polskiej elektroenergetyki.

Podczas dwóch dni Sympozjum odbyło się 7 sesji, w ramach których wygłoszone zostały 24 referaty. Sesje poprowadzili Waldemar Szulc – dyrektor Biura w Towarzystwie Gospodarczym Polskie Elektrownie, dr hab. inż. Rafał Kobyłecki z Politechniki Częstochowskiej oraz Krzysztof Brunné – prokurent i zastępca dyrektora ds. technicznych, *Pro Novum sp. z o.o.*

Sympozjum rozpoczęła debata techniczna pt. *Przyszłość energetyki konwencjonalnej*, którą poprowadził Waldemar Szulc (TGPE), a w której udział wzięli: Herbert Gabryś, Michał Cegielski (*TAURON Wytwarzanie SA*), prof. Roman Krok (Politechnika Śląska), Grzegorz Pakuła (*Grupa Powen-Wafapomp SA*) i Jerzy Trzeczyski (*Pro Novum sp. z o.o.*).



Ewa Trzeczyska, Pro Novum sp. z o.o.



Jerzy Trzeczyski, Pro Novum sp. z o.o.



Waldemar Szulc, TGPE



Michał Cegielski,
TAURON Wytwarzanie SA

Wstępem do debaty były trzy wystąpienia:

- 1) Herbert Gabryś: AKTUALNY STAN ENERGETYKI POLSKIEJ – WYBRANE INFORMACJE,
- 2) Ewa Trzeczcyńska (*Pro Novum sp. z o.o.*): O ENERGETYCE KONWENCJONALNEJ PODCZAS KONGRESU VGBE W ANTWERPII, 14-15.09.2022 r.,
- 3) Jerzy Trzeczcyński (*Pro Novum sp. z o.o.*): BLOKI 2022+. ZAŁOŻENIA DO STRATEGII KONTYNUOWANIA EKSPLOATACJI BLOKÓW KLASY 200 MW.

Agenda debaty obejmowała n.w. zagadnienia.

- Na jak długo należy zaplanować eksploatację bloków węglowych w Polsce, żeby zapewnić bezpieczną transformację naszej energetyki?
- Jaką rolę do odegrania w okresie transformacji polskiej energetyki powinny spełniać bloki klasy 200 MW?
- Wg jakich kryteriów bloki węglowe powinny być wycofywane z eksploatacji?
- Jaki w tym czasie może być tryb ich pracy, w tym status po wyłączeniu z eksploatacji?
- W jaki sposób najbardziej racjonalnie (od 2025 roku) można spełnić kryterium 550 g CO₂/kWh na blokach węglowych?
- Czy zastępowanie węgla biomasą oraz paliwami alternatywnymi jest realistyczne z punktu widzenia: dostępności paliwa, kosztów modernizacji i eksploatacji, elastyczności źródeł wytwarzania?
- Jak zapewnić kompetencje techniczne, zwłaszcza w obszarze utrzymania stanu technicznego urządzeń energetycznych?

Uczestnicy debaty oraz licznych dyskusji w trakcie Sympozjum byli zgodni co do tego, że nie sposób wyobrazić sobie bezpieczeństwa energetycznego Polski bez dobrze zaplanowanej eksploatacji bloków węglowych w całym okresie transformacji sektora energetyki. Tempo wycofywania bloków węglowych powinno być odpowiednio zsynchronizowane nie tylko z oddawaniem do eksploatacji nisko- i zeroemisyjnych źródeł generacji. Bloki węglowe powinny, w odpowiednim trybie, pracować tak długo, aż nowy mix energetyczny będzie można uznać za bezpieczny i ekonomicznie akceptowalny. Po energetykę węglową sięgają w ostatnim czasie wszystkie kraje europejskie, nawet takie, w których generacja energii z węgla odgrywa niewielką rolę. Szczególną rolę powinno się powierzyć energetyce opartej na węglu kamiennym, której



Od lewej: Herbert Gabryś, Grzegorz Pakuła – Grupa Power-Wafapomp SA, Jerzy Rażny – Veolia Energia Poznań SA

w przeciwieństwie do energetyki opartej na węglu brunatnym nie grozi wyczerpanie własnych zasobów w dającej się przewidzieć przyszłości. Znaczącą rolę w okresie transformacji mogą i powinny odegrać bloki klasy 200 MW, których stan techniczny pozwala nie tylko na bezpieczne przedłużenie eksploatacji, ale także poprawę ich elastyczności. Powinny odegrać większą niż im dotąd przypisano rolę w tzw. przejściowym okresie transformacji energetycznej, jeśli tylko nakłady na ich modernizację oraz kompetencje zwłaszcza w zakresie utrzymania stanu technicznego sprawią, że mogą pełnić regulacyjną rolę w systemie elektroenergetycznym. *Pro Novum* od dłuższego czasu lansuje strategię zaawansowanych technicznie serwisów LTSA z Partnerami Technologicznymi. Podczas tegorocznego Sympozjum zaprezentowaliśmy nasze związki techniczne i przykłady ich realizacji z ważnymi polskimi firmami remontowymi. To najlepszy sposób na zapewnienie kompetencji technicznych w długim czasie oraz na wysokiej jakości diagnostykę, remonty i modernizacje. Podczas tegorocznego Sympozjum przedstawiono założenia projektu BLOKI 2022+, który wykorzystując najlepszą wiedzę i doświadczenia z eksploatacji bloków klasy 200 MW oraz rozwiązania opracowane na potrzeby Programu Bloki 200+ stworzyłby warunki do zapewnienia naszego bezpieczeństwa energetycznego w okresie najbliższych ok. 15 lat. Koncepcję projektu konsultowano przed Sympozjum. Była także dyskutowana w jego trakcie. Jednym z rezultatów konsultacji była modyfikacja jego nazwy na BLOKI 2025+®. Zakładamy, że ma szansę na powodzenie, zwłaszcza, jeśli do konsultacji włączą się elektrownie oraz przedstawiciele odpowiednich agend rządowych. Mamy nadzieję, że za rok, podczas kolejnego Sympozjum *Pro Novum*, poinformujemy zarówno o postępach procedowania projektu BLOKI 2025+®, jak również o sukcesach związanych z komercjalizacją *Metody Pro Novum* poprawy elastyczności bloków klasy 200 MW opracowanej i zweryfikowanej podczas realizacji Programu Bloki 200+ oraz zaprezentowanej podczas tegorocznego Sympozjum wraz z założeniami do jej komercjalizacji.

Sympozjum *Pro Novum* po raz kolejny pokazało, że w branży energetycznej istnieje potrzeba wszechstronnej dyskusji na tematy techniczne i wymiany doświadczeń.



Jerzy Rażny,
Veolia Energia Poznań SA



Remigiusz Kruzel,
Enea Elektrownia Połaniec SA



Mariusz Saratowicz, OZW SEP

