

prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda
Instytut Techniki Cieplnej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Mateusza Bryka,
zatytułowanej „**Zaawansowana kontrola stanu łopatk promieniowej w
trakcie pozaprojektowych zmian obciążenia za pomocą narzędzi Thermal -
FSI**”

1. Zasadność podjęcia tematu

W okresie ostatnich kilku lat następuje intensywna restrukturyzacja źródeł wytwórczych w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym. W jej wyniku rośnie moc zainstalowana w sektorze OZE, głównie elektrowni fotowoltaicznych i wiatrowych, charakteryzujących się brakiem stabilności w generacji energii elektrycznej, a mających wysoki priorytet w dostępie do sieci. Tradycyjne bloki parowych siłowni ciepłych stanowią wciąż istotną kategorię w bilansie mocy. Równocześnie, w zaistniałej sytuacji podlegają one silnym wymuszeniom związanym z bilansowaniem mocy w KSE wynikającym ze zmienności zapotrzebowania systemu i wysokiej dynamiki podaży energii z OZE. Skutkuje to koniecznością dynamicznych i głębokich zmian ich obciążenia, co stanowi istotne zagrożenie dla ich stanu technicznego, w głównej mierze wynikające z dynamiki obciążenia termicznego w obrębie wrażliwych na zmiany elementów konstrukcyjnych. W turbinach parowych szczególnie wrażliwe na tego typu wymuszenia są ich wysoko obciążone elementy pracujące przy wysokich parametrach pary. Czynnikiem potęgującym zagrożenie są złożona geometria oraz połączenia elementów konstrukcyjnych pracujących w strefie wysokich parametrów pary.

W elektrowniach krajowych zainstalowanych zostało 16 bloków parowych o mocy 360 MW, z których 12 zbudowano w zasobach elektrowni Bełchatów, tradycyjnie funkcjonującej, z uwagi na niskie koszty generacji, w podstawie obciążenia KSE. Większość tam użytkowanych turbin poddano na przełomie pierwszej i drugiej dekady XXI wieku modernizacji, w ramach której podniesiono parametry pary za kotłami oraz dokonano wymiany części WP i SP na konstrukcje pozbawione stopnia regulacyjnego, wyposażone w stopień promieniowo-osiowy. Sprawdzona wcześniej konstrukcja okazała się, w warunkach Elektrowni Bełchatów źródłem kilku spektakularnych awarii polegających na poważnych uszkodzeniach stopnia promieniowo-osiowego części WP. Awarie te, wskazujące na wysoką wrażliwość połączenia łopatek kierowniczych pracujących w strefie napływu promieniowego pary do turbiny z kadłubem, zamocowanych na obu ich końcach w masywnym kadłubie wewnętrznym stały się źródłem inspiracji do rozważań przedstawionych w rozprawie mgr inż. Mateusza Bryka. Rozważania te dotyczą analizy możliwości bezpiecznej pracy wskazanego krytycznego węzła konstrukcyjnego turbiny w warunkach dynamicznych zmian obciążenia.

Mgr inż. Mateusz Bryk, podejmując w pracy doktorskiej wskazaną problematykę skorzystał z doświadczenia oraz bogatych tradycji badawczych macierzystej jednostki - IMP PAN, w analizach cieplno-przepływowych i wytrzymałościowych dotyczących turbin parowych, z zastosowaniem zaawansowanych metod obliczeniowych, z wykorzystaniem metod polowych, w tym przypadku Thermal-FSI. Dobór tematyki należy uznać za trafny, skutkujący

możliwością rozwinięcia interesującego, zarówno ze względu na problematykę jak i walory aplikacyjne, obszaru badawczego.

2. Charakterystyka i ocena ogólna rozprawy

Oceniana rozprawa jest dość obszerna, spisana została na 169 stronach, Autor podzielił ją na 7 ponumerowanych rozdziałów. Dodatkowo zamieszczone zostały w niej streszczenia w językach polskim i angielskim, spis tabel, rysunków oraz wykaz cytowanej literatury. Na końcu zamieszczony został załącznik zawierający dane materiału konstrukcyjnego łopatek i kadłuba. Na liście cytowań znalazły się 124 pozycje, w 14 spośród nich Doktorant jest współautorem lub pierwszym współautorem. Prace w znacznej części opublikowane zostały w renomowanych czasopiśmie zagranicznych (w tym 2 pozycje w Energy) i krajowych. Należy zauważyć, **mgr inż. Mateusz Bryk dysponuje obfitym, znacznie przekraczającym oczekiwania wobec doktoranta, dorobkiem publikacyjnym.**

Pierwszy rozdział rozprawy, zatytułowany *Wstęp*, stanowi szerokie wprowadzenie czytelnika w rozważaną problematykę. Na początku wskazane zostały uwarunkowania prowadzące do wymuszenia dynamicznych zmian obciążenia działających w KSE bloków energetycznych dużej mocy. Jako kolejne zagadnienie rozważono krytyczne elementy konstrukcyjne turbin parowych, ze wskazaniem rzutujących na ich pracę i trwałość zagadnień eksploatacyjnych. Autor posłużył się tu przykładem będącej przedmiotem dalszych rozważań w rozprawie turbiny 18K390, to jest wyposażonej w stopień promieniowo-osiowy, poddanej modernizacji turbiny 18K360. Omówiona została konstrukcja części WP, w tym przedstawione zostały bliższe szczegóły dotyczące stopnia promieniowo-osiowego, z uwzględnieniem geometrii, luzów oraz ze wskazaniem cech konstrukcyjnych które, zdaniem Doktoranta, doprowadziły do uszkodzeń łopatek części promieniowej, a w konsekwencji do awarii. W kolejnej części rozdziału omówione zostały systemy ograniczeń termicznych (Turbomax, BOTT) i ich rola w nadzorowaniu i kontroli naprężeń w kluczowych elementach turbin.

W rozdziale 1.2 wskazane zostały cele, a następnie tezy pracy.

- pierwszym z celów jest *analiza możliwości przeprowadzenia przyspieszonego rozruchu i odstawienia turbiny ze stopniem promieniowo – osiowym za pomocą kontrolowanego wtrysku pary chłodzącej przy zachowaniu poziomu naprężenia i odkształcenia na bezpiecznym poziomie;*
- jako drugi cel Doktorant wskazał *propozycję algorytmu zaawansowanego BOTTa, który uwzględnia wpływ naprężenia termicznego na stopień promieniowy.*

Trzy postawione dalej tezy są następujące:

1. *Zintegrowane modele FSI (Fluid–Structure Interaction), uwzględniające równoczesne oddziaływanie termiczne, pozwalają na precyzyjną ocenę reakcji łopatki na pozaprojektowe warunki obciążeniowe i umożliwiają wskazanie potencjalnych obszarów krytycznych z dużą dokładnością.*
2. *Przeprowadzenie sprzężonych analiz FSI (Fluid–Structure Interaction), uwzględniających wzajemne oddziaływanie przepływu i obciążeń termiczno-mechanicznych, pozwala istotnie poprawić dokładność wyznaczenia rozkładu naprężeń w łopacie promieniowej, a tym samym zwiększa niezawodność przewidywania jej żywotności w warunkach pozaprojektowych*
3. *Wykorzystanie wyników zaawansowanej analizy FSI może stanowić podstawę do opracowania systemu algorytmu zaawansowanej kontroli stanu elementu krytycznego i jego zaawansowanej diagnostyki. Zaawansowana kontrola może zostać sprzęgnięta ze*

sterowaniem wtryskiwanej pary, co jest przedmiotem konkretnego praktycznego rozwiązania na obiekcie.

W końcowej części wstępu Doktorant wskazał na oryginalny charakter prowadzonych rozważań, wysoki stopień ich trudności, wymagający wykorzystania zaawansowanych narzędzi obliczeniowych. Thermal-FSI stanowi oryginalne połączenie CFD metody objętości skończonych (polihedralnych) i CSD metody elementów skończonych (8 węzłowych).

W rozdziale drugim, noszącym tytuł: *Model matematyczny dedykowany startom i odstawieniom urządzeń energetycznych* przedstawione zostało zastosowanie w rozprawie narzędzie badawcze oparte na metodzie obliczeniowej Fluid-Structure Interaction (FSI). Autor wskazał, że w pracy wykorzystane zostało jednostronne sprzężenie Thermal FSI w celu określenia wpływu prowadzonego rozruchu i odstawienia na wartości pola naprężenia i odkształcenia. W tym podejściu pola temperatury są eksportowane do solwera CSD jako warunki brzegowe. Rozdział zawiera prezentację stosowanych w modelach CFD oraz CSD równań bilansowych, wskazanie na wykorzystanie modelu turbulencji $k-\omega$ SST oraz uzasadnienia dla wykorzystania przy wyznaczaniu poziomu naprężenia w analizowanej konstrukcji hipotezy Hubera-Misesa-Henckyego (H-M-H).

Krótki rozdział trzeci rozprawy poświęcony został przeglądowi literaturowemu w celu weryfikacji analizy Thermal-FSI. Doktorant wskazał w konkluzji, że: podejście zintegrowane umożliwia bardziej precyzyjne przewidywanie zachowania termomechanicznego komponentów w porównaniu do oddzielnych analiz CFD i CSD. Stanowi to podstawę do wsparcia tezy, że metoda ta powinna być narzędziem do projektowania wysoko obciążonych termicznie elementów.

W rozdziale czwartym, zatytułowanym *Walidacja modelu Thermal – FSI na podstawie rzeczywistej awarii stopnia promieniowo – osiowego* Doktorant przeprowadził analizę opartą na wykorzystaniu danych literaturowych, umożliwiających odwzorowanie geometrii oraz warunków pracy turbiny wyposażonej w stopień promieniowo-osiowy. Przypadek odniesiono, jak się wydaje do wspomnianej konstrukcji części WP turbiny 18K390. Wskazuje na to podpis pod rys.41 (*Widok na osadzenie łopatki promieniowej i wirnikowej stopnia promieniowo – osiowego w kadłubie wewnętrznym w Elektrowni Bełchatów*). Z drugiej strony mgr inż. M. Bryk wskazuje na brak dostępu do stosownych danych geometrycznych, w szczególności luzów w zamocowaniu łopatki części promieniowej analizowanego stopnia, liczby łopatek części promieniowej itp. Dane te zostały przyjęte do dalszych analiz w rozprawie w wyniku oszacowań jej autora. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych z zakresu analizy sprzężonego pola cieplno-przepływowego Doktorant wskazał, że wnioski pozwalają na identyfikację mechanizmów prowadzących do uszkodzenia łopatek zgodnych z przypadkiem odnotowanym w awarii turbiny. Potraktowane zostało to jako eksperymentalna walidacja modelu, potwierdzająca poprawność przyjętych założeń modelowych oraz metodologii obliczeniowej. W tym i w następnych rozdziałach, w celu analizy wpływu zagęszczenia siatek obliczeniowych przeprowadzono analizę niezależności siatek. Dyskretyzację prowadzono korzystając z siatek wielościennych zarówno dla domeny płynu jak i ciała stałego, z zastosowaniem automatycznej adaptacji warstwy granicznej. Wyniki analizy numerycznej zaprezentowane zostały na kolejnych rysunkach obrazujących: pole temperatury w kadłubie wewnętrznym i osadzonej w nim łopatce (rys.49-55), pole naprężeń zredukowanych w łopatce (rys.56), pole przemieszczeń osiowych w łopatce (rys.57), wykresy ilustrujące zmiany naprężeń oraz przemieszczeń w różnych kierunkach w funkcji czasu, dla dwóch wybranych punktów przy stopce łopatki. Podstawowym wnioskiem z przedstawionej analizy Thermal-FSI jest stwierdzenie poprawności modelu, ze wskazaniem,

że wskazane miejsca krytyczne są zlokalizowane tam, gdzie doszło do pierwotnych uszkodzeń w trakcie wspomnianej wcześniej awarii łopatek kierowniczych stopnia promieniowo-osiowego.

Rozdział 5 *Określenie założeń konstrukcyjno -przepływowo – wytrzymałościowych do analizy Thermal – FSI pozaprojektowych zmian obciążenia łopatki promieniowej* zawiera opis zaproponowanych przez Doktoranta koncepcji chłodzenia parowego w strefie łopatki promieniowej rozważanej konstrukcji, celem ograniczenia naprężeń oraz umożliwienia przyspieszonego w stosunku do standardowego rozruchu turbiny. Doktorant zaproponował 4 sposoby doprowadzenia pary chłodzącej, wymagające nawiercen w kadłubie wewnętrznym. Do dalszych rozważań wybrane zostało, moim zdaniem trafnie, rozwiązanie polegające na doprowadzeniu pary do kolektorów zlokalizowanych na poziomie stopki i bandaża łopatki części promieniowej rozważanego stopnia. Kolejnym krokiem był dobór szczegółowej geometrii analizowanego fragmentu konstrukcji, z uwzględnieniem nominalnych wartości luzów zamocowań łopatki oraz uszczelnienia. Autor wzorował się na danych dotyczących turbiny 18K390, jednak z uwagi na brak publicznie dostępnych informacji posłużył się oszacowaniami opartymi na obliczeniu wydłużenia termicznego dla najwyższej przewidywanej wartości temperatury. Oszacowanie to jest inne od przyjętego wcześniej do analiz przeprowadzonych w rozdziale 4 dla wartości luzu promieniowego oznaczonego literami B i C (odpowiednio rys.72 i rys.44), luz osiowy został utrzymany, choć jest zauważalnie zaniżony w stosunku do wartości oryginalnej. W obliczeniach uwzględnione zostały 3 warianty geometrii kolektorów doprowadzających parę o ciśnieniu wyższym od ciśnienia pary świeżej o 1, 2, 3, 4 i 5% i temperaturze niższej o 100°C. Podobnie jak w rozdziale poprzednim przeprowadzona została analiza niezależności siatki. Rozważone zostały warianty geometrii: referencyjna – bez modyfikacji konstrukcji służącej doprowadzeniu pary chłodzącej oraz zmodyfikowana. Wyniki zostały obficie zilustrowane rysunkami. Mankamentem jest jednak bałagan w ich numeracji. Do części podane zostały błędne numery, część rysunków, jak mi się wydaje, w pracy nie została zamieszczona. Szczegóły podałem w uwagach redakcyjnych. Autor nie przedstawił koncepcji dotyczącej miejsca poboru i sposobu przygotowania pary chłodzącej o wyższym ciśnieniu i niższej temperaturze, co moim zdaniem byłoby celowe. Będę zobowiązany za stosowny komentarz Doktoranta. W rezultacie przeprowadzonych obliczeń Autor uzyskał oszacowanie niezbędnej ilości pary chłodzącej w analizowanych przypadkach. Jako najlepszy spośród rozważanych wybrany został pierwszy wariant geometrii kolektorów doprowadzających parę chłodzącą i jej ciśnienie podwyższone o 4% w stosunku do ciśnienia pary świeżej. Wyniki zostały zestawione w tabeli 4. Zdanie komentarza nad tą tabelą nie zostało zakończone, zabrakło też objaśnienia występującego w tabeli symbolu Tw. Jak można przypuszczać, chodzi zapewne o temperaturę wylotową pary (za łopatką części promieniowej stopnia 1) – po zmieszaniu pary świeżej i chłodzącej (uśrednioną, w wybranym punkcie?). Zabrakło mi tu też komentarza dotyczącego wpływu obniżenia temperatury pary na osiągi turbiny. Oczekuję komentarza Doktoranta dotyczącego tych uwag.

Zasadnicze dla tematu rozprawy prace obliczeniowe zostały zaprezentowane w jej rozdziale 6, noszącym tytuł: *Analizy Thermal – FSI pozaprojektowych zmian obciążenia łopatki promieniowej*. Przedmiotem rozważań były analizy prowadzone: dla trzech krzywych rozruch-odstawienie (cykle 44 000 s, 33 000 s i 22 000 s), czterech wartości temperatury pary chłodzącej (niższa odpowiednio o 50, 100, 150 i 300°C niż pary świeżej), geometrii referencyjnej (bez chłodzenia) oraz zmodyfikowanej (wybrany w rozdziale poprzednim wariant I geometrii kolektorów chłodzących). W wyniku analizy niezależności siatki symulacje przeprowadzono dla 400 tys. elementów w obu analizowanych wariantach

geometrii. Podstawowym rezultatem obliczeń CFD był obraz rozkładu temperatury domeny ciała stałego w kolejnych chwilach czasowych (obliczenia prowadzone były z krokiem symulacji 5 sekund), stanowiący podstawę do obliczeń wytrzymałościowych. W rozdziale zamieszczono bardzo obfity zestaw wyników w postaci wizualizacji rozkładu temperatury metalu dla kolejnych analizowanych przypadków. Kolejnym działaniem była analiza wyników obliczeń CSD związanych z naprężeniami na wybranych powierzchniach związanych z zamocowaniem łopatki oraz jej częścią profilową uznanych za kluczowe miejsca konstrukcji a także przemieszczeniami. Szczególną uwagę Doktorant poświęcił naprężeniom zredukowanym wg hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego oraz naprężeniom normalnym w osi OZ. Jako optymalną strategię minimalizacji naprężeń w rozważanej łopacie Doktorant wskazał umiarkowane chłodzenie (różnica temperatury rzędu 50°C w stosunku do pary świeżej), a intensywne, przy temperaturze pary chłodzącej utrzymywanej na poziomie 300°C, za oddziałujące negatywnie i powodujące wzrost naprężeń. Ostatnia część rozdziału poświęcona została zagadnieniu kasacji luzów w obrębie zamocowania łopatki w kadłubie. Nie mam pewności które luzy do jakiego miejsca się w analizach odnoszą. Luzy zostały oznaczone numerami: 1, 2 i 3, bez dokładnego wskazania rysunku, na którym można by je zidentyfikować. Na zamieszczonym w rozprawie rys.44 luzy oznaczono literami A, B, C i D, podobnie na rys.72. Na rys.111 i rys.112 numerami oznaczono płaszczyzny dla analizy przemieszczeń i wytrzymałościowej. Na rys.71 luzy oznaczono w dwóch miejscach czerwonymi obwódkami, bez wskazania numerów. Będę zobowiązany za stosowne wyjaśnienia Doktoranta.

Ostatni, siódmy rozdział rozprawy zawiera prawidłowo sformułowane wnioski. Całość rozprawy została skomponowana logicznie, kolejne rozdziały stanowią sekwencję opisu następujących po sobie uzasadnionych logicznie działań. Doktorant wykazał się głęboką znajomością aktualnego stanu wiedzy w poruszanej problematyce i umiejętnością wykorzystania zaawansowanych narzędzi obliczeniowych stosowanych w analizach CFD i CSD. Przeprowadził oryginalne rozważania, rozwiązując zdefiniowane wcześniej zadania. Tezy pracy zostały potwierdzone, zaś zdefiniowany, opisany na jej początku oryginalny cel naukowy został poprawnie rozwiązany i osiągnięty.

Moim zdaniem istotnym walorem rozprawy jest otwarcie ścieżki do wdrożenia hybrydowego systemu monitorowania, z możliwością integracji symulacji Thermal-FSI z technologią cyfrowego bliźniaka, a w konsekwencji na bieżącą kontrolę ryzyka technicznego w instalacjach parowych, z uwzględnieniem uwarunkowań eksploatacyjnych, w warunkach silnego wymuszenia zmienności obciążenia. Strona redakcyjna rozprawy została oceniona w kolejnym rozdziale niniejszej opinii.

3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne

Należy podkreślić, że w rozprawie przedstawione zostały liczne analizowane przypadki, wymagające szeregu pracochłonnych obliczeń numerycznych, wymagające wielowariantowych obliczeń, popartych badaniami niezależności przyjętych siatek, z koniecznością sprawdzenia różnych scenariuszy eksploatacyjnych. Działania te były niezwykle pracochłonne i wymagały do Autora olbrzymiego nakładu związanych prac. W takim przypadku spisanie wszystkich szczegółów niesie ryzyko popełnienia błędów, na których weryfikację autorowi może brakować już cierpliwości i czasu. Liczba zauważonych w rozprawie usterek o charakterze redakcyjnym jest zauważalna. Większość z nich jest zapewne wynikiem drobnych niedopatrzeń lub rezultatem przeredagowywania rozprawy w kolejnych jej wersjach.

Przykładowe usterki redakcyjne wymieniam poniżej:

- Str.31., pierwsze zdanie w rozdziale 1.1.3.2. *System BOTT nadzoruj* – brak ostatniej litery słowa nadzoruje, podobne usterki widoczne są np. na str. 34, str.35;
- Str.50, wzór na energię krytyczną, parametr k_r poniżej oznaczony jako k_t ;
- Str.58, pierwszy akapit rozdziału 4.2. Odwołanie do rys.8 nie jest poprawne;
- str.79, pierwszy akapit rozdz.5.2. *Podejście to różni się od zastosowanego w rozdziale 3.2.1 gdzie luz określono na podstawie oszacowania graficznego*. W tekście rozprawy rozdział 3.2.1 nie figuruje. Chodzi przypuszczalnie o rozdział 4.1;
- str.88, rys.82 jest praktycznie identyczny z rys.47. Nieco inne są jedynie proporcje pomiędzy wymiarami osi poziomej i pionowej;
- str.88, numeracja rysunków na które Autor powołuje się w ostatnich pięciu akapitach na tej stronie została podana błędnie. Zamiast *Rysunki 73-75* powinno być, moim zdaniem 83-85. Zamiast 78, 81, 84 powinno być, moim zdaniem 86, 87, 88. Zamiast *Na rysunkach 85-89* powinno być, moim zdaniem: Na rysunkach 89-93. Nie udało mi się odnaleźć przywołanych odpowiedników rysunków 76, 79 i 82 oraz rysunków 77, 80 i 83. Będę zobowiązany za stosowne wyjaśnienie Doktoranta, czy rysunki w pracy się znalazły, a jeśli nie, sugeruję ich przedstawienie w stosownym suplemencie;
- str.95, pierwsza linia akapitu pod rysunkami. Pomyłona ponownie numeracja rysunków: 73-75, zamiast 83-85;
- str.96, drugi i trzeci akapit. Powtórzyły się błędne numery rysunków, analogiczne do wskazanych na str.88;
- str.96, zdanie nad tabelą 4 nie zostało dokończone;
- str.97, rys.94. Błędnie podana jednostka na skali temperatury;
- str.97, wstępna część rozdziału 6. Zabrakło prezentacji puli stanów pracy, dla których w rozdziale przeprowadzono analizy. Pula tych stanów pojawia się bez zapowiedzi i wyjaśniającego komentarza. Dotyczy to na przykład trzech analizowanych procesów rozruchu i odstawienia o różnym czasie trwania (wskazane na str. 97), wprowadzenia chłodzenia parą o temperaturze o 300°C niższej niż para świeża (str. 98);
- str.116, długi akapit. *łopatka promieniowa rozgrzewa się do 550-570°C*. Oznaczałoby to temperaturę metalu wyższą od temperatury napływającej pary świeżej, która w przedstawionych symulacjach nie przekracza, zgodnie z rys.94, poziomu 550°C. Jeśli jest inaczej, będę zobowiązany za komentarz Doktoranta;
- Bibliografia, niepełny w wielu miejscach opis cytowanych źródeł literaturowych. Na przykład [39], [65], [66], [118] – brak informacji o wydawnictwie.

Wykaz dalszych zauważonych usterek tego typu zostanie przekazany Doktorantowi w opiniowanym egzemplarzu rozprawy. Inne przykłady niedociągnięć lub usterek w treści rozprawy zostały skomentowane poniżej.

W rozprawie mamy do czynienia z bardzo obfitym materiałem graficznym w postaci rysunków ilustrujących sekwencyjnie, jeden po drugim rozkład parametrów uzyskanych w wyniku symulacji numerycznych, z wykorzystaniem metod polowych. Wyniki nie zawsze są łatwe do śledzenia. Pierwszy przykład to rysunki od 49 do 55 na których przedstawiono rozkład temperatury w kadłubie analizowanej turbiny w kolejnych chwilach czasowych analizowanego procesu, którego parametry zilustrowano na na rys.47. Na każdym z rysunków we wskazanej serii przyjęto inny zakres skali temperatury. Skutkuje to trudnością we wzrokowym śledzeniu dynamiki zmian temperatury metalu. Jednolite skale dla kolejnych chwil czasowych zostały przyjęte natomiast w ilustracji pola naprężeń w łopacie (rys.56) czy

przemieszczeń osiowych (rys.57). Drugi przykład dotyczy rysunków 59-64. Oś czasu wyskalowano na nich w godzinach. Jak się wydaje, nawiązują one do krzywej rozruchu i odstawienia z rys.47, gdzie skala czasu wyskalowana została w sekundach. Przebieg temperatury zilustrowany na rys.47 dotyczy wartości na wlocie do analizowanej geometrii. Wykresy ilustrujące przebieg temperatury na rysunkach 59-64 nie są z nimi w pełni zbieżne co do charakteru. W komentarzach do tych rysunków nie odnalazłem informacji, do jakiego miejsca czy elementu odnosi zaznaczona na nich temperatura. Analizy nie ułatwia brak skali temperatury na wspomnianych rysunkach, a jedynie zaznaczona jej wartość maksymalna. Będę zobowiązany za wyjaśnienie ze strony Doktoranta.

Podobne uwagi jak do rys.49-55 należy odnieść do kolejnych rysunków zamieszczonych w rozdziale 6. Na przykład na rys.96 znajdują się wyniki dla obliczeń rozkładu temperatury, dla trzech kolejnych chwil czasowych i dla trzech różnych prędkości rozruchu. Każdy z tych rysunków cząstkowych ma inną granicę dolną i górną skali temperatury i w przybliżeniu tę samą, jak mi się wydaje, paletę kolorów. Patrząc na te figurujące na wspólnej stronie rysunki trudno wzrokowo ocenić obiektywne różnice pomiędzy nimi. Można się zdać jedynie na dość oszczędny w słowach komentarz Doktoranta. Uwagi o podobnym charakterze odnoszą się do większości pozostałych zestawień, podobnie skonfigurowanych w dalszej części rozprawy rysunków.

4. Ostateczna ocena pracy

Do cennych osiągnięć Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- kompleksowy, dobrze przygotowany warsztat badawczy oparty o zaawansowane narzędzia obliczeniowe potrzebne do wykorzystania w metodzie Thermal-FSI,
- trafnie dobrany zakres przeprowadzonych analiz numerycznych, z uwzględnieniem istotnych dla rozważanego problemu, mających wpływ czynników,
- wspomniane wcześniej w mojej opinii otwarcie ścieżki do wdrożenia hybrydowego systemu monitorowania.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny rozprawy. Uważam, że należy podkreślić jeszcze raz wysoką pracowitość i szeroki zakres przeprowadzonych analiz.

Autor rozprawy, mgr inż. Mateusz Bryk, wykazał się wiedzą teoretyczną w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna*, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to z jej treści.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autor, mgr inż. Mateusz Bryk wykazał opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Bryka pt.: *Zaawansowana kontrola stanu łopatki promieniowej w trakcie pozaprojektowych zmian obciążenia za pomocą narzędzi Thermal - FSI* spełnia wymogi określone w Ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2024 poz. 1571 z późniejszymi zmianami). W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.



