

Prof. dr hab. inż. Waldemar Jędral
emerytowany profesor zwyczajny
w Instytucie Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

Warszawa, 2025-01-16

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Bieńkowskiego

p.t.: **Zwiększenie produktywności turbozespołu wodnego z turbiną Francisa poprzez eliminację lub minimalizację zjawiska kawitacyjnego wiru sznurowego**

Recenzję opracowano na prośbę Rady Dyscypliny Naukowej: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej (pismo W9/PW/627/2024 z dnia 17.11.2024 r.), zgodnie z Zawiadomieniem nr 27/11/D08/2024-2028 z dnia 18.11.2024 r.

1. Charakterystyka formalna pracy

Opiniowana rozprawa doktorska została wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Sławomira Pietrowicza, profesora Politechniki Wrocławskiej; promotorem pomocniczym był dr inż. Przemysław Szulc. Rozprawa liczy łącznie 207 stron wraz ze streszczeniami w języku polskim i angielskim, wykazem ważniejszych oznaczeń oraz wykazem literatury. Rozprawa reprezentuje dyscyplinę naukową *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka* w dziedzinie *Nauki Inżynieryjno-Techniczne*.

Rozprawa jest podzielona na 13 rozdziałów.

W krótkim **rozdziale 1**, będącym wstępem do pracy, przedstawiono rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) na świecie podkreślając, że ponad połowa wytworzonej przez nie energii elektrycznej pochodzi z elektrowni wodnych (EW). Zwięźle omówiono ich rozwój i rodzaje, w szczególności rozwój EW na Dolnym Śląsku. Na tym tle przedstawiono problemy z pracą turbozespołów w EW Pilchowice I, których rozwiązanie było celem pracy.

W **rozdziale 2**, przywołując kilkanaście pozycji literatury, omówiono rozwiązania konstrukcyjne, parametry geometryczne i zależności funkcyjne dotyczące działania i właściwości rur ssących, które są ważnym elementem turbin wodnych, zwłaszcza o dużych wyróżnikach szybkobieżności. Omówiono też zagadnienie kawitacji w turbinach wodnych.

Rozdział 3 zawiera obszerny przegląd literatury dotyczącej ograniczania intensywności oraz rozbijania wirów sznurowych, m.in. przez zatłaczanie powietrza do wirnika lub rury ssącej, wtrysk wody lub wstawianie różnych elementów stałych w obręb rury ssącej.

W **rozdziale 4** przedstawiono główne cele pracy, sformułowano tezę rozprawy oraz założony zakres pracy.

W **rozdziale 5**, po szczegółowym przedstawieniu EW Pilchowice I, zakresu jej parametrów pracy oraz zainstalowanych w niej turbozespołów, opisano problemy eksploatacyjne wynikające z tworzenia się wirów sznurowych podczas pracy turbin z niepełnym obciążeniem. Wykonano szereg badań doświadczalnych, obejmujących m.in. wyznaczenie charakterystyk turbiny przy różnych spadach oraz pomiary drgań w różnych warunkach pracy. Zauważono słyszalne stuki i hałas w części hydraulicznej turbiny przy jej niepełnym obciążeniu.

Rozdział 6 zawiera omówienie wyników badań numerycznych wykonanych przy użyciu oprogramowania ANSYS Fluent CFD 2021 R2. Zastosowano metodę RANS, wykorzystując różne modele turbulencji. Zbudowano model 3D układu przepływowego turbiny i przygotowano szereg siatek obliczeniowych. Uzyskano bardzo dobrą zgodność zmierzonych i wyznaczonych numerycznie charakterystyk turbiny. Walidację modelu w zakresie rozkładów prędkości wykonano wykorzystując szczegółowe dane dotyczące turbiny modelowej, udostępnionej przez Uniwersytet w Trondheim w Norwegii na zorganizowanych tam warsztatach. Zamieszczono szereg rysunków potwierdzających zgodność wyników obliczeniowych z danymi doświadczalnymi dla wspomnianej turbiny modelowej, co umożliwiło zastosowanie opracowanego modelu numerycznego do opisanych dalej badań.

W **rozdziale 7** przedstawiono obszerne wyniki symulacji numerycznych przepływu w turbinie Francisa turbozespołu TZ-2 w EW Pilchowice I, wykonanych przy zastosowaniu modelu turbulencji k- ω . W warunkach poza optymalnej pracy turbiny obliczenia pokazały występowanie znacznego wiru o strukturze spiralnej, schodzącego z płaskiej powierzchni piasty wirnika.

Rozdział 8 zawiera omówienie wyników wstępnych badań numerycznych obejmujących różne sposoby ograniczania zjawiska wirów sznurowych. Najbardziej skuteczne okazało się umieszczenie żeber na ścianach rury ssącej. Tę właśnie metodę wybrano do dalszych prac badawczych, poszukujących najlepszego rozwiązania dla turbin w EW Pilchowice I.

W **rozdziale 9** omówiono wykonaną analizę wymiarową, zaś w **rozdziale 10** przedstawiono plan badań opracowany przy wykorzystaniu techniki planowania eksperymentu.

W **rozdziale 11** przedstawiono wyniki wielu symulacji numerycznych przepływu w badanej rurze ssącej, wykonanych dla różnych kombinacji liczby i wymiarów żeber, w postaci rozkładów ciśnień statycznych wzdłuż rury i w kilku przekrojach poprzecznych oraz rozkładów prędkości i trajektorii cząstek wody przemieszczających się wzdłuż rury. Na podstawie analizy wymiarowej i obliczeń numerycznych opracowano zależności empiryczne na moc na wale turbiny oraz parametr S_n (swirl number) w funkcji długości rury ssącej i geometrii żeber.

W **rozdziale 12** wykonano wstępne symulacje numeryczne 15 wariantów żeber o różnych geometriach, oceniono ich wyniki oraz wykonano poszerzone obliczenia dla 3 wytypowanych wariantów. Na ich podstawie wybrano, jako najlepszy, wariant RS7 geometrii żeber.

Rozdział 13 jest podsumowaniem wyników pracy zawierającym wnioski końcowe oraz sugestie dotyczące ewentualnych dalszych badań.

Praca zakończona jest wykazem literatury liczącym 95 pozycji, z których znaczna większość to publikacje stosunkowo nowe, z roku 2000 i lat późniejszych.

2. Uwagi ogólne

2.1. Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnienia skutecznego eliminowania wirów sznurowych, powstających w rurach ssących turbin wodnych Francisa, powodujących kłopoty eksploatacyjne i straty energii oraz dodatkowe koszty. Zwłaszcza obecnie, w obliczu możliwego już niebawem wystąpienia problemów z bezpieczeństwem energetycznym kraju, niezawodna, bezawaryjna praca turbin wodnych, mogących dostarczać energię elektryczną w warunkach najtrudniejszych dla systemu elektroenergetycznego, staje się szczególnie ważna.

2.2. Rozprawa obejmuje szeroki zakres prac analitycznych i obliczeniowych – w obszarze numerycznej symulacji przepływów turbulentnych w badanej turbinie wodnej, uzupełnionych przez niezbędne badania doświadczalne. Poszczególne elementy badań zostały bardzo starannie zaplanowane i wykonane, a ich wyniki przedstawiono w przejrzystej, czytelnej formie graficznej. Wymagało to wielu bardzo pracochłonnych, wieloetapowych obliczeń i czasochłonnego ich opracowania.

2.3. Z powyższych względów zarówno wybór tematu rozprawy, stanowiącej próbę rozwiązania rzeczywistych problemów w realnie działającej elektrowni wodnej Pilchowice I, jak też zrealizowany zakres prac oceniam bardzo wysoko. Uwagi krytyczne dotyczą głównie usterek redakcyjnych i nie obniżają wartości opiniowanej rozprawy.

3. Uwagi szczegółowe

3.1. Uwagi merytoryczne

Recenzent nie znalazł w opiniowanej rozprawie poważniejszych błędów merytorycznych, toteż uwagi zamieszczone w tym punkcie nie mają charakteru zarzutów. Są to uwagi głównie dyskusyjne, które warto uwzględnić w dalszych pracach i w publikacjach.

3.1.1. We wzorach (2.1)-(2.4) i na rysunku 2.1 występuje ciężar właściwy γ . W układzie jednostek SI jest to pojęcie niepoprawne i zamiast niego powinno się stosować iloczyn gęstości i przyspieszenia ziemskiego (ρg), a więc np. $p_a/(\rho g)$, zamiast p_a/γ .

3.1.2. W wykazie oznaczeń, s. 7₃, występuje kąt α_0 ustawienia łopatek kierownicy. W tabelicy 5.5 (s. 80) oraz na stronach 114⁴ i 119₉ mowa jest zaś o otwarciu kierownicy wynoszącym 85% i 62%. Otwarcie (rozwarcie) kierownicy a_0 , mm, określane jest zwykle jako odległość sąsiednich łopatek. Tymczasem na stronie 142₁ podano, że 62% – odpowiadające kątowi ustawienia $\alpha_0 = 10^\circ$, to 62% przełyku. Należałoby uściślić nazwy i poprawnie powiązać ze sobą te wartości, np. w postaci prostego rysunku i tabelki wiążącej wartości α_0 , a_0 i wartość otwarcia podaną w %.

3.1.3. Wartości niektórych parametrów geometrycznych żeber w tabelicy 10.3 (s. 141) dla wariantów RS9-RS15 wykraczają poza założony (tabl. 10.1) zakres ich wartości. Jak to uzasadnić?

3.1.4. W podrozdziale 11.2 (s. 157-163) wyprowadzono wzór (11.29) na moc na wale turbiny, a w podrozdziale 11.3 wzór (11.59) na wielkość S_n (swirl number), w funkcji parametrów geometrycznych żeber ograniczających zawirowanie cieczy. Niezbyt jasno przedstawiono cel wyprowadzenia tych wzorów, ważnych tylko dla kąta ustawienia łopatek kierownicy równego 10° . Czy służą one tylko do wyboru najkorzystniejszego wariantu geometrii żeber? Jeśli tak, to analogiczne wzory np. dla kąta $\alpha_0 = 8^\circ$ mogą sugerować inny wariant optymalnej geometrii. A może analogiczne wzory otrzymano także dla innych otwarć kierownicy? Nie podano też wyraźnie, czy rysunki 12.1-12.4 otrzymano z ww. wzorów czy też jako wyniki symulacji numerycznych.

3.1.5. Na rysunkach 12.28-12.31 pokazano rozkłady $S_n(L_{wrs})$ dla różnych kątów otwarcia łopatek kierownicy ($\alpha_0 = 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ$ i 22°). Należy rozumieć, że są to wyniki symulacji numerycznych. Czy wzory (11.29) i (11.59) wyprowadzono i wykorzystano po to, aby wykonać te symulacje tylko dla 3 a nie 15 zestawów (wariantów) parametrów geometrycznych żeber?

3.1.6. W wielu miejscach pracy używane jest sformułowanie *przepływ z krętem*. Ponieważ kręt (moment pędu) jest wielkością fizyczną, lepsze jest sformułowanie: przepływ z zawirowaniem.

3.2. Uwagi formalne i porządkowe

W pracy, zwłaszcza w jej części opisowej, jest sporo niedociągnięć redakcyjnych. Być może są one wynikiem tego, że doktorant włożył tak wiele pracy w wykonanie badań, że nie starczyło mu już cierpliwości (a może i czasu) na bardziej staranną redakcję tekstu

Poniżej wymieniono ważniejsze z zauważonych przez recenzenta usterek i nieścisłości, pomijając tzw. literówki i drobne błędy stylistyczne. Podane przy numerach stron wskaźniki liczbowe dotyczą numerów wierszy, licząc od góry lub od dołu strony.

- 7¹⁶ – warto dodać np.: (wysokość) geometryczna; prędkości; ciśnienia itp.
- 7²⁰⁻²² – wg 7¹⁶ te wysokości powinny być oznaczone małymi literami
- 7²³ – powinno być: liczba, np. łopatek, żeber (nie: ilość)
- 7₂₃ – należało dodać: dynamiczny (wyróżnik szybkobieżności)
- 8¹ – stopień (nie: współczynnik) rozwarcia
- 8³⁻⁵ – należało dodać: turbiny (a nie np. generatora)
- 10¹ – raczej: najstarszą, nie zaś: jedną z najstarszych
- 11²³ – zwiększony poziom drgań, nie: drgania
- 13 – na rysunku 2.1 zamiast p_2 powinno być p_a
- 14¹³ – powinno być: różnica wartości wyrazów z prędkościami (nie: prędkości)
- 14₃ – powinno być: z przetykiem, nie: na przetyku (żargon)
- 15² – moc nie może wypytywać z wirnika
- 17⁴ – średnica wirnika jest tak duża..., nie zaś:...posiada gabaryty
- 17_{6,7} – co to jest: długość osiowa, oraz: głębokość i długość posadowienia ?
- 18^{9,13} – co to jest głębokość rury ?
- 19² – powinno być: energii proporcjonalnej do... (nie: równoważnej...)

- 21⁷ – kąta rozwarcia (nie: rozszerzenia)
- 22₃ – powinno być: wartość sprawności, ew. sprawność (nie: współczynnik sprawności)
- 23₄ – lepiej: definiując kąt zawirowania jako...
- 25₁ – powinno być: Jak wynika z rysunku 2.12... (to nie jest rozumowanie)
- 26² – wzór (2.13) przedstawia energię właściwą, tj. energię podzieloną przez masę
- 26⁸ – to nie prędkość jest odzyskiwana, ale energia prędkości
- 26_{5,7} – zamiast p_r powinno być p_{ar}
- 29₅ – wirnik nie może kawitować
- 30 – te same wielkości są różnie oznaczane, np. n_s (s.30 – rys. 2.15 i wzór 2.23) i n_{sN} (s. 30₉, s. 7₂₃); h_b (s. 30¹⁵) i H_b (s. 7²⁰), ale też B (s. 14^{7,10,12})
- 32⁴ – ... wyróżnika (nie: współczynnika) szybkobieżności,...
- 33₁₄ – liczba Strouhala oznaczana jest zwykle przez Sh (nie: Sr)
- 36₅ – lepiej: moment pędu, niż pęd styczny (albo po prostu: ...składową obwodową)
- 38₁ – podpis pod rys. 3.3b jest nieadekwatny do jego zawartości
- 39⁷ – powinno być: ...w miarę wzrostu ilości doprowadzonego powietrza
- 51₁₂ – rowki mają raczej kształt litery „l”, nie „j”
- 54⁴ – przez ω oznaczono wcześniej prędkość kątową wirnika turbiny
- 70 – w tablicy 5.1 zamiast: natężenie przepływu, lepiej: przepływ
- 70₄ – co to jest „moc czynnika” (tabl. 5 1.)?
- 76^{4,20} – zamiast żargonowych: obroty; zabudowano, lepiej: prędkość obrotowa; zainstalowano
- 84 – na osi pionowej rys. 5.15 – złe wartości liczbowe, jeśli mają być wyrażone w mm
- 87-89 – na rys. 5.19. 5.21-5.23 warto by opisać (oznaczyć cyframi) poszczególne krzywe, w obecnej formie rysunki są mało czytelne
- 90⁷ – zamiast: ze zregulowaniem (żargonowo), lepiej: z regulacją; ta sama uwaga dotyczy rys. 5.24 oraz tekstu np. na stronach 102, 104, 195)
- 93₅ – co to znaczy „wyciągnięcie profili poza poprzeczne przekroje”?
- 99₁₄ – „obliczenia wykonane zostały na zasobach komputerowych...” – żargonowe
- 110₅ – co to znaczy „z nadmiernie niedługim czasem”?

114-118 – w podpisach pod rysunkami 7.1-7.9 zamiast: w punkcie P1, lepiej: w punkcie pracy P1; ta sama uwaga dotyczy punktów P2 (rys. 7.10-7.16)

128₁₃ – ... został zastosowany, nie: zaaprobowany

129₄ – powinno być: zapobieganie przepływowi obwodowemu (nie: promieniowemu)

135¹⁴ – powinno być: lepkość kinematyczna, oznaczana na ogół przez ν , nie przez γ

182-192 – w siedmiu miejscach na str. 182-192 powinny być skorygowane numery wzorów, np.: s. 182₂ : 12.11-12.13, zamiast 12.9-12.10; s. 184⁵ : 12.11-12.13 zamiast 12.8-12.10 itd.

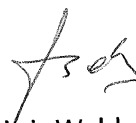
W opisach, m.in. w rozdziale 2, jest sporo zdań/akapitów sformułowanych bardzo niezręcznie lub wręcz niezrozumiale, np.: s. 14₆₋₈, 21 – cały pierwszy akapit; 31^{7,8}; 39^{1,2}; 41 – dwa ostatnie akapity; 54 – pierwszy akapit; 74^{9,10}; 93_{1,2}; 102_{6,7}, 119 – oba akapity; 120 cały akapit; 140_{1,2}; 196 – akapit pod rys. 12.33. Należy je przeredagować, jeśli będą podstawą innych publikacji.

Wymieniono wyżej dość znaczną liczbę usterek redakcyjnych; są one jednak mało wazące dla oceny pracy, ze względu na dużą wartość merytoryczną i praktyczną recenzowanej rozprawy.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

1. Zagadnienie, będące przedmiotem opiniowanej rozprawy, jest interesujące ze względów poznawczych i jednocześnie ważne praktycznie, z powodu realnych problemów związanych z występowaniem w turbinach wodnych wirów sznurowych i stwarzanych przez nie kłopotów eksploatacyjnych. Eliminacja tych wirów, nawet tylko częściowa, może skutkować zwiększeniem produkcji energii elektrycznej przez EW Pilchowice I oraz mniej uciążliwym użytkowaniem turbozespołów.
2. Rozprawa przedstawia wyniki wykonanych obszernych badań numerycznych przepływów w turbinie turbozespołu TZ-2, poprzedzone utworzeniem modelu 3D układu przepływowego turbiny i jego walidacją w laboratorium Uniwersytetu w Trondheim. Aby ograniczyć zakres i tak bardzo obszernych badań doktorant wykonał szczegółową analizę z dziedziny planowania eksperymentu. Badania numeryczne zostały uzupełnione dość obszernymi badaniami doświadczalnymi, obejmującymi niezbędny zakres parametrów hydraulicznych oraz wibracyjnych turbozespołu.

3. Wyniki szerokich, pracochłonnych obliczeń przepływów dla trzech wariantów geometrii żeber umieszczonych w rurze ssącej, wybranych na podstawie wstępnych symulacji, przedstawił autor w eleganckiej formie graficznej na wielu czytelnych rysunkach.
4. Na podstawie analizy wyników obliczeń doktorant wybrał wariant optymalny (RS7), charakteryzujący się wydatnym ograniczeniem intensywności wirów sznurowych występujących podczas pracy turbiny ze znacznie zmniejszonym obciążeniem, przy utrzymaniu wysokiej sprawności maksymalnej. Warto podkreślić, że planowane jest zainstalowanie żeber o wybranej geometrii w rurze ssącej turbozespołu TZ-2 w EW Pilchowice.
5. Ze wszystkich powyższych względów opiniowaną pracę doktorską należy ocenić bardzo wysoko. Rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka* oraz umiejętność samodzielnego, oryginalnego rozwiązania ważnego problemu naukowo-badawczego, będącego jej przedmiotem. Uwagi krytyczne dotyczą głównie usterek formalnych i w żadnym stopniu nie umniejszają merytorycznej i praktycznej wartości opiniowanej rozprawy.
6. Reasumując stwierdzam, że dysertacja mgr inż. Jacka Bieńkowskiego p.t.: **Zwiększenie produktywności turbozespołu wodnego z turbiną Francisa przez eliminację lub minimalizację zjawiska kawitacyjnego wiru sznurowego** spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i może być dopuszczona do publicznej obrony.



/prof. dr hab. inż. Waldemar Jędrał/