

Prof. dr hab. inż. Robert Sekret

Politechnika Częstochowska

Wydział Infrastruktury i Środowiska

Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych

42 – 201 Częstochowa, ul. J.H. Dąbrowskiego 69

E-mail: robert.sekret@pcz.pl

Częstochowa, dn. 04.11.2025 r.

Szanowny Pan

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nadolny

Dziekan

Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki

Politechniki Poznańskiej

ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Dawida Czajora

pt. „Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych w istniejącym
systemie ciepłowniczym”

1. Wprowadzenie

Recenzja niniejsza została napisana w odpowiedzi na pismo
Nr WISIE.63.57.2025 z dnia 18 września 2025 roku.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Dawida Czajora
pt. „Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych w istniejącym systemie

ciepłowniczym” zawiera łącznie 167 strony. Rozprawa została podzielona na 12 głównych rozdziałów i uzupełniona: bibliografią, spisem ważniejszych oznaczeń, streszczeniem w języku polskim i angielskim. We wprowadzeniu do rozprawy doktorskiej (rozdział 1 pracy) Doktorant odniósł się do celowości i wagi wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w istniejącym systemie ciepłowniczym w kontekście wyzwań transformacji energetycznej i zaspakajania energetycznych potrzeb społeczeństwa. W rozdziale tym ujął również tezę, cel i zakres pracy. Rozdział 2 rozprawy doktorskiej to przegląd obecnego stanu wiedzy. Doktorant odniósł się w nim do osiągnięć i wykorzystania uczenia maszynowego i sztucznych sieci neuronowych w systemach ciepłowniczych oraz elektroenergetycznych. Rozdział 2 rozprawy doktorskiej kończy się wskazaniem oryginalności podjętej problematyki na bazie obecnego stanu wiedzy. W rozdziale 3 Doktorant zaprezentował obiekt badawczy, tj. system ciepłowniczy wraz kogeneracyjnym źródłem energii. W tej części pracy Doktorant przedstawił również aspekty prawno-finansowe oraz perspektywę utrzymania stabilności systemu elektroenergetycznego poprzez integrację instalacji wytwórczych wykorzystujących energię wiatru, słońca i źródeł gazowych. Rozdział 4 rozprawy to opis algorytmów do zbierania danych na potrzeby opracowania modelu sztucznej sieci neuronowej. W rozdziale tym Doktorant przedstawił: wykorzystane narzędzia programistyczne, opis danych źródłowych z systemu ciepłowniczego oraz źródła kogeneracyjnego, dane meteorologiczne, specyfikę Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, dane o cenach energii elektrycznej na Rynku Bilansującym, czy dane o cenach paliwa gazowego na Towarowej Giełdzie Energii. Od rozdziału 5 do rozdziału 10 Doktorant przedstawił prognozowanie: zapotrzebowania na ciepło u odbiorcy końcowego, zapotrzebowania na ciepło w źródle, zapotrzebowania na paliwo dla źródła, stanów pogodowych, cen energii elektrycznej na Rynku Bilansującym, cen paliwa gazowego. Każdy z tych rozdziałów ma powtarzalną strukturę, tj. zawiera: opis mechanizmu prognozowania, aspekty niedokładności, walidację oraz wyniki i ich analizę. Rozdział 11 stanowi opis wdrożenia algorytmów uczenia maszynowego z wykorzystaniem sieci neuronowych w istniejącym systemie ciepłowniczym. W ramach tej części rozprawy doktorskiej Doktorant przedstawił: dane o systemie informatycznym wybranego obiektu badawczego, wymagania sprzętowe, moduły oprogramowania, moduły wykonawcze, uproszczoną analizę finansową oraz wizualizację prognozy istotnych parametrów pracy systemu ciepłowniczego. Rozdział 12 to podsumowanie, wnioski i końcowe

uwagi autora. Doktorant w tej części rozprawy odniósł się w szczególności do: postawionej tezy badawczej, zamieścił dyskusję wyników z badań, przedstawił wnioski końcowe oraz wskazał kierunki dalszych prac.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską nie wnoszę uwag krytycznych do jej układu. Struktura pracy jest przemyślana, czytelna i logicznie ułożona. Wykorzystana terminologia jest poprawna. Edycja pracy jest bardzo staranna, język w pełni zrozumiały zarówno dla czytelnika ze środowiska naukowego, jak również otoczenia społeczno-gospodarczego. Pomimo swej objętości praca jest zwięzła. Uważam, że Doktorant nabył umiejętności poprawnej organizacji i edycji rozprawy doktorskiej.

Doktorant przeprowadził analizę obecnego stanu wiedzy w zakresie podjętego do rozwiązania problemu badawczego w oparciu o 128 pozycji bibliograficznych, z czego zdecydowana większość to publikacje z ostatnich 5-10 lat. Pozycji starszych niż 15 lat jest tylko 8. Wykorzystane źródła literaturowe odnoszą się do tematu pracy a biorąc pod uwagę, że główny wzrost liczby publikacji o obiegu międzynarodowym w podjętej problematyce to okres ostatnich 15 lat należy stwierdzić, że przegląd ten jest wystarczający. Doktorant w sposób logiczny przedstawił argumenty za koniecznością podjęcia się badań w zakresie wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w istniejącym systemie ciepłowniczym. Uważam, że przegląd istniejącego stanu wiedzy zawiera wystarczające informacje uzasadniające wybór tematu i problemu naukowego rozprawy doktorskiej.

Problematyka poprawy efektywności energetycznej, środowiskowej i ekonomicznej istniejących systemów ciepłowniczych stanowi kluczowy element transformacji energetycznej sektora wytwarzania, przesyłu, dystrybucji i wykorzystania ciepła. Jednym z istotnych elementów dostosowania wydajności systemu ciepłowniczego do aktualnych potrzeb użytkowników końcowych przy jednoczesnym efektywnym zarządzaniu zasobami naturalnymi i minimalizacją kosztów wytworzenia i dostawy ciepła jest umiejętność wykorzystania historycznych i bieżących danych z pracy systemu ciepłowniczego (źródła ciepła, sieci ciepłowniczej, odbiorców ciepła) oraz baz danych z otoczenia prawno-finansowego, czy prognoz pogody. Wymaga to zastosowania zaawansowanych procedur optymalizacyjnych jako narzędzi wsparcia prowadzenia działalności gospodarczej. Dlatego też, podjęcie się rozwiązania

problemu dotyczącego zastosowania sztucznych sieci neuronowych na cele prognozy: zapotrzebowania na ciepło, ceny energii elektrycznej oraz ceny paliwa gazowego, z akceptowalną dokładnością, dla istniejącego systemu ciepłowniczego zasilanego z kogeneracyjnej elektrociepłowni gazowej jest trafne i w pełni uzasadnione zarówno z poznawczego i aplikacyjnego punktu widzenia.

Doktorant poprawnie sformułował tezę, cele i zakres pracy. Ponadto przedstawione w rozdziale 1 schematy: końcowego systemu do sterowania predykcyjnego elektrociepłownią oraz kontraktowaniem zakupu paliwa gazowego i sprzedażą energii elektrycznej w podziale na zastosowane typy sieci neuronowych, następnie systemu do prognozy parametrów w systemie ciepłowniczym z wykorzystaniem jednokierunkowych sieci neuronowych służących do prognozowania: zapotrzebowania na ciepło przez odbiorców końcowych, zapotrzebowania na ciepło oraz paliwo gazowe dla źródła oraz opracowanego systemu do prognozy parametrów wspierających system ciepłowniczy z wykorzystaniem rekurencyjnych sieci neuronowych służących do prognozowania: ceny energii elektrycznej na Rynku Bilansującym oraz ceny paliwa gazowego na Towarowej Giełdzie Energii, jak również parametrów meteorologicznych w dłuższym horyzoncie czasowym, jednoznacznie potwierdzają szeroki zakres oraz ciekawość rozprawy doktorskiej. Uważam, że Doktorant wykazał się umiejętnością poprawnego formułowania i prezentacji tezy, celu i zakresu rozprawy doktorskiej.

Opis obiektu badawczego, tj. systemu ciepłowniczego oraz źródła kogeneracyjnego jest wystarczający. Przedstawienie kontekstu prawno-finansowego przy opisie obiektu badawczego jest wartościowe a dodatkowo uzasadnia konieczność transformacji energetycznej nie tylko badanego systemu ciepłowniczego, ale również pozostałych systemów ciepłowniczych kraju. Doktorant precyzyjnie przedstawił podstawy metodyki badań, tj. algorytmy do zbierania danych na potrzeby budowy modelu sztucznej sieci neuronowej. Opisy są wystarczające, obejmują istotne parametry pracy systemu ciepłowniczego oraz jego otoczenia, czy wymogi prawno-finansowe rynku ciepła. Opisy mechanizmów prognozowania również nie budzą zastrzeżeń czy wskazane procedury walidacji. Przyjęte założenia dla struktury poszczególnych bloków obliczeniowych Doktorant

przedstawił w sposób czytelny. Należy podkreślić, że stopień szczegółowości poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej dotyczących prognozowania jest w pełni wystarczający. Dlatego też, pozytywnie oceniam umiejętności Doktoranta w zakresie poprawnego wyboru obiektu i metodyki badań dla przyjętego celu naukowego.

Nie mam krytycznych uwag do uzyskanych przez Doktoranta wyników badań zarówno szczegółowych, jak i podsumowania, wniosków i uwag końcowych. Są one logiczne, wynikają z treści pracy oraz przyjętego i zrealizowanego zakresu pracy. Oceniając tą część pracy doktorskiej uważam, że Doktorant wykazał się umiejętnością prezentacji uzyskanych wyników badań, ich analizy oraz formułowania wniosków. Po szczegółowej analizie rozprawy doktorskiej stwierdzam, że uzyskane przez Doktoranta wyniki badań wnoszą istotny wkład zarówno do wiedzy teoretycznej, jak i praktycznej, niezbędnej w procesach transformacji energetycznej systemów ciepłowniczych. Praca, mimo szerokiego zakresu obejmującego zagadnienia od podstawowych aspektów po kwestie związane z budową, eksploatacją oraz zarządzaniem istniejącym systemem ciepłowniczym, jest zwięzła i spójna. Każda jej część precyzyjnie odpowiada na postawione cele oraz wyznaczony zakres badań.

Istotnym elementem ocenianej pracy doktorskiej jest wdrożenie opracowanych algorytmów uczenia maszynowego z wykorzystaniem sieci neuronowych w istniejącym systemie ciepłowniczym.

Uwagi dyskusyjne

1. Dla jakiej temperatury powietrza zewnętrznego wykonano obliczenia?
2. W jaki sposób realizowano utrzymanie temperatury zasilania sieci ciepłowniczej zgodnie z tabelą regulacyjną?
3. Czy bilans prowadzono w ujęciu dobowym, czy godzinowym?
4. Czy w modelowaniu i wdrażaniu aplikacji uwzględniono nieliniowe własności dynamiczne systemu ciepłowniczego?
5. Czy opracowana aplikacja stanowi narzędzie ostateczne, czy wymaga ciągłego monitoringu i kalibracji modeli SSN,
6. Jakie są kluczowe wyzwania związane z wdrożeniem sztucznych sieci neuronowych w istniejącym systemie ciepłowniczym?

3. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Dawida Czajora pt. „Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych w istniejącym systemie ciepłowniczym” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z obszaru efektywności energetycznej systemów ciepłowniczych i wnosi nowy stan wiedzy do dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Elementem nowości ocenianej rozprawy jest opracowana aplikacja, która została zaimplementowana w przedsiębiorstwie ciepłowniczym. Umożliwia ona regulację źródeł wytwórczych w oparciu o predykcyjne zapotrzebowanie na ciepło u odbiorców końcowych przy uwzględnieniu kryterium ekonomicznego. Rozprawa doktorska zawiera również praktyczne rekomendacje do projektowania systemów kontroli i nadzoru pracy kogeneracyjnych źródeł wytwórczych opartych o sztuczne sieci neuronowe. Uważam, że rozprawa doktorska potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętności do prowadzenia pracy naukowej. Jej poziom merytoryczny spełnia wymagania obecnych przepisów w tym zakresie.

Wobec powyższego moja ocena jest pozytywna i wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

