

**prof. dr hab. inż. Jacek Kamiński**

Kraków, 23 grudnia 2023 r.

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN

Zakład Polityki Energetycznej i Rynków Energii

Pracownia Ekonomiki Energetyki

ul. Wybickiego 7A

31-261 Kraków

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr. inż. Jakuba Białka**

**pt.:**

*Wyjaśnianie predykcji i szacowanie wpływu dryfu danych na jakość modeli*

*Uczenia Maszynowego prognozujących zapotrzebowanie na energię*

*na przykładzie modelu prognozującego zapotrzebowanie na ciepło*

*w Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej*

napisanej pod kierunkiem naukowym promotora

**dr. hab. inż. Wojciecha Bujalskiego, prof. uczelni**

oraz promotora pomocniczego

**dr. inż. Konrada Wojdana**

### **I. Podstawa formalna recenzji**

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Pana Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego, z dnia 24 października 2023 roku, w sprawie powołania mnie na recenzenta przedmiotowej dysertacji.

### **II. Charakterystyka pracy oraz jej ocena jako rozprawy doktorskiej**

1. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Białka dotyczy istotnej dla lokalnych systemów ciepłowniczych problematyki prognozowania zapotrzebowania na ciepło. Od jakości prognoz zależy bowiem efektywność funkcjonowania tych

systemów, co bezpośrednio wpływa na koszty produkcji i dystrybucji ciepła, a w konsekwencji na ceny ciepła dla odbiorców końcowych. Sformułowany przez Doktoranta **problem badawczy** należy uznać za ważny i aktualny, ze względu na duży udział lokalnych systemów ciepłowniczych w pokrywaniu zapotrzebowania gospodarstw domowych i przemysłu na ciepło. Prace badawcze ukierunkowane na pogłębienie stanu wiedzy w zakresie polepszenia jakości modeli predykcyjnych wykorzystywanych w systemach ciepłowniczych nabierają szczególnego znaczenia w świetle drastycznych wzrostów cen paliw do produkcji ciepła, obserwowanych szczególnie w ostatnich latach. W tym kontekście podkreślić należy wkład Doktoranta polegający na analizie i weryfikacji modelu prognozującego zapotrzebowanie na ciepło w Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej (WSC).

W odniesieniu do zaproponowanej przez Doktoranta metodyki badań stwierdzić należy, że choć literatura przedmiotu opisuje już zastosowane w pracy metody, to ich wykorzystanie w pracy należy uznać za nowatorskie. Doktorant opracował bowiem własne podejście bazujące na metodach szacowania wpływu dryfu danych na jakość predykcji modeli do prognozowania zapotrzebowania na ciepło w dużych systemach ciepłowniczych. Zaproponował, zaimplementował i zweryfikował na modelu prognostycznym WSC propozycje autorskich rozwiązań określania wpływu wielkości dryfu na jakość modeli uczenia maszynowego poprzez szacowanie błędu modelu na horyzoncie predykcji.

Stwierdzam, że wybór zastosowanych w pracy metod jest odpowiedni do rozwiązania problemu badawczego postawionego przez Doktoranta. Zaproponowana metodyka jest jednocześnie uniwersalna i może zostać wykorzystana nie tylko w Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej, ale również w innych systemach, które planują wdrożenie modeli prognostycznych bazujących na metodach uczenia maszynowego.

- Praca obejmuje 104 strony maszynopisu (łącznie z bibliografią oraz dodatkiem A). Praca została podzielona na pięć rozdziałów zasadniczych wraz z wprowadzeniem i podsumowaniem. W pracy zamieszczono również spis treści oraz źródeł literaturowych liczący łącznie 46 pozycji. Wybór literatury oraz pozostałych źródeł danych i informacji, choć stosunkowo niewielki liczbowo, jest odpowiedni. Świadczy on o dość dobrym rozeznaniu Doktoranta w aktualnym stanie wiedzy w przedmiotowej dziedzinie.

3. Praca posiada adekwatną dla rozprawy doktorskiej szatę graficzną. Rysunki i tabele zostały opatrzone odpowiednimi podpisami, które nie powodują problemów interpretacyjnych.
4. Praca jest napisana odpowiednim językiem naukowym. Pomimo pewnych potknięć edycyjnych, praca została napisana językiem przystępnym.
5. Przyjęty **tytuł rozprawy** został sformułowany poprawnie i precyzyjnie. Odzwierciedla on wagę i aktualność problemu.
6. **Cele badawcze** pracy sformułowane zostały przez Doktoranta w sposób następujący:  
*(1) Analiza użyteczności narzędzi wyjaśniających modele predykcyjne XAI dla modeli prognozujących zapotrzebowanie na energię na przykładzie modelu prognozującego zapotrzebowanie na ciepło w WSC. (2) Przeprowadzenie weryfikacji modelu Sztucznej Sieci Neuronowej prognozującego zapotrzebowanie w WSC za pomocą wybranych narzędzi XAI i na tym przykładzie stworzenie spójnych wytycznych do przeprowadzania tego typu analiz na modelach prognozujących zapotrzebowanie na energię. (3) Badanie dryfu danych na modelu prognostycznym WSC. Teoretyczna i praktyczna analiza sposobów wykrywania dryfu, określania jego rodzaju, szacowania wielkości dryfu oraz wpływu dryfu na dokładność predykcji modelu. Biorąc pod uwagę znaczenie prognozowania zapotrzebowania na ciepło oraz innych zmiennych kluczowych dla funkcjonowania systemów ciepłowniczych i energetycznych (np. generacja w elektrowniach wiatrowych lub fotowoltaicznych), stwierdzić należy, że cel pracy został sformułowany w sposób odpowiedni.*
7. Doktorant sformułował **tezy badawcze** w sposób następujący:  
*Teza 1. Możliwe jest wykorzystanie metod XAI do stworzenia interpretowalnych wyjaśnień predykcji dla złożonych modeli typu black-box opartych o algorytmy Sztucznych Sieci Neuronowych prognozujących zapotrzebowanie na energię i stworzenie procesu weryfikacji wzorców wyuczonych przez model poprzez konfrontację wyjaśnień predykcji z oczekiwaniami wynikającymi z praw fizyki i wiedzy technicznej.*  
*Teza 2. Możliwe jest stworzenie algorytmów, których zadaniem jest weryfikacja czy założenia postawione w procesie tworzenia modeli SSN prognozujących zapotrzebowanie na energię są spełniane w produkcyjnym okresie korzystania modelu, w szczególności czy występuje dryf danych i jaki jest jego wpływ na jakość predykcji modelu.*

Obie tezy badawcze zostały sformułowane odpowiednio. Zauważalny jest bezpośredni związek pomiędzy tytułem, celem pracy oraz tezami badawczymi. Przeprowadzony w dysertacji wywód naukowy pozwala na pozytywne zweryfikowanie przedmiotowych tez.

## 8. Treść rozprawy

Praca rozpoczyna się rozdziałem obejmującym wprowadzenie, uzasadnienie wyboru tematu, opis zastosowanych metod, sformułowanie celów, tez i zakresu pracy. W rozdziale tym Doktorant przedstawia również aktualny stan wiedzy oraz opisuje swój wkład w rozwój dyscypliny.

W rozdziale drugim zaprezentowany został badany model, który został opracowany w ramach Systemu Wspomagania Decyzji na potrzeby Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej. W rozdziale przedstawiono architekturę modelu, jego moduły oraz wykorzystane metody prognostyczne. Szczególną uwagę poświęcono kwestiom danych i zmiennych wejściowych, które podzielone zostały na dwie główne grupy, tj. zmienne pogodowe oraz kalendarzowe.

Rozdział trzeci skupia się przede wszystkim na wyjaśnieniu predykcji modelu prognostycznego z wykorzystaniem narzędzi XAI. W rozdziale tym przedstawiono analizę działania wybranych metod XAI dla modeli prognozujących zapotrzebowanie na energię tej klasy co analizowany model. Doktorant wybiera cztery metody (PI, LIME, PD, SHAP), które, zgodnie z jego deklaracją, potwierdziły użyteczność w przypadku modeli uczenia maszynowego, a następnie opisuje je i przedstawia wyniki uzyskane z wykorzystaniem tych modeli. Następnie analizuje model z wykorzystaniem wybranej metody oraz przedstawia wyniki analizy zstępującej XAI modelu prognostycznego WSC.

W czwartym rozdziale Doktorant koncentruje się na kwestii monitorowania modeli prognozujących zapotrzebowanie na ciepło po wdrożeniu w przedsiębiorstwie. Rozważa teoretyczne kwestie dryfu danych, a następnie analizuje wpływ dryfu cech na jakość prognoz wykonanych z wykorzystania modelu predycyjnego. Przeprowadza następnie dyskusję wyników oraz przedstawia rekomendacje do rozwiązań praktycznych.

Rozdział piąty stanowi podsumowanie zebranych wyników, zweryfikowanie tez pracy, sformułowanie wniosków oraz wskazanie dalszych kierunków badań.

9. **Ogólna ocena pracy jako rozprawy doktorskiej jest bardzo dobra.** Zarówno treść pracy, jak również opracowane narzędzia do analizy dryfu danych, które zostały wykorzystane do rozwiązania problemu postawionego badawczego, świadczą o odpowiednim warsztacie naukowym Doktoranta. **Opracowane narzędzia do analizy dryfu danych oraz otrzymane z ich wykorzystaniem wyniki pracy stanowią elementy nowości naukowej oraz są oryginalnym dorobkiem naukowym Doktoranta, potwierdzający umiejętność prowadzenia prac badawczych.**

### III. Uwagi polemiczne oraz kwestie dyskusyjne

1. Merytoryczne uwagi polemiczne oraz kwestie wymagające wyjaśnienia przez Doktoranta:
  - 1.1. Czym podyktowany był wybór modelu prognozującego zapotrzebowanie na ciepło w Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej (WSC) jako przedmiotu rozważań naukowych? Czy w WSC prognozowane są jeszcze jakieś inne zmienne z wykorzystaniem metod Uczenia Maszynowego? Proszę o komentarz.
  - 1.2. W rozdziale 3 (str. 23) Doktorant deklaruje, że: *spośród metod działających niezależnie od analizowanego algorytmu wybrano 4, które potwierdziły swoją użyteczność w przypadku wielu klas modeli UM: • PI (ang. Permutation Importance) [20], • LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) [21], • PD (Partial Dependence) [22], • Shapley Additive exPlanations (SHAP) [23].* W Tabeli 1 zestawiono zalety i wady, ale tylko metod wykorzystanych w pracy. Czy Doktorant rozważał ewentualne inne metody oceny jakości modeli prognostycznych? Jeśli tak, to jakie inne metody były przez Doktoranta rozważane? Proszę o wyjaśnienie.
  - 1.3. Do wyjaśnień predykcji analizowanego modelu Doktorant wybrał metodę SHAP, uzasadniając swój wybór w stosunku do pozostałych trzech metod wymienionych w pracy. Choć w dysertacji przedstawiono szczegółowe wyniki oceny modelu z użyciem metody SHAP, to analiza wykorzystująca pozostałe trzy metody jest dość pobieżna. Proszę o uszczegółowienie, czy otrzymane rezultaty, które nie zostały zawarte w treści pracy, różniły się znacznie od wyników zastosowania metody SHAP?
  - 1.4. Jak powszechne, wg wiedzy Doktoranta, jest stosowanie modeli bazujących na metodach uczenia maszynowego do prognozowania zapotrzebowania na ciepło w

krajowych dużych systemach ciepłowniczych. Czy Doktorant mógłby wskazać jakieś inne systemy ciepłownicze korzystające z tego rodzaju narzędzi? Proszę o komentarz.

1.5. W rozdziale 4 (str. 60) Doktorant deklaruje, że *przedmiotem rozważań (...) są zagadnienia związane ze statystycznymi właściwościami modelu tj. dotyczące zmian rozkładów zmiennych wejściowych i zmiennej celu oraz ich wpływu na jakość predykcji modelu. Nie będą natomiast poruszane kwestie związane z jakością danych wejściowych (np. braki w danych, błędne dane) czy monitorowaniem infrastruktury modelu (np. czas potrzebny na wykonanie predykcji)*. Niemniej jednak, problemy z jakością danych wejściowych (wspomniane braki danych oraz błędne parametry) również bardzo często występują w codziennej pracy z modelem. Jak często mają miejsce tego rodzaju błędy w przypadku modelu prognostycznego wdrożonego w WSC? Proszę o komentarz.

1.6. W analizie dryfu koncepcji (str. 82) Doktorant wspomina cenę ciepła deklarując, że *z różnych powodów nie uwzględniono tej zmiennej w modelu (np. brak danych historycznych lub niewielka wariancja wartości)*. Czy brak danych historycznych jest rzeczywistą przeszkodą we włączeniu cen ciepła do modelu? Wydaje się, że głównym powodem jest wspomniana niewielka wariancja wartości. Ponadto, jakie trudności mogłyby wystąpić, gdyby włączono jednak ceny ciepła do modelu prognostycznego, w szczególności, gdyby były to ceny bazujące na taryfach dynamicznych. Proszę o komentarz.

2. Pomimo dobrego stylu pisarskiego, wykorzystującego odpowiednie pojęcia z dziedziny nauk inżynierjno-technicznych Doktorant nie ustrzegł się pewnych drobnych błędów edycyjnych (np. „Model UM używane są” (str. 9), „produkcje energii z elektrowni jądrowych jest silnie skorelowana” (str. 10). Pominięto je w treści niniejszej recenzji.

3. Przedstawione wcześniej uwagi i kwestie dyskusyjne nie obniżają wartości naukowej recenzowanej rozprawy oraz nie umniejszają osiągnięć i wiedzy Doktoranta.

#### IV. Wniosek końcowy

1. Przedmiotowa rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego w dziedzinie: **nauk inżynierjno-technicznych**, w dyscyplinie: **inżynieria**

**środowiska, górnictwo i energetyka.** Przedstawioną do recenzji pracę mgr. inż. Jakuba Białka uważam za dzieło udane pod względem naukowym.

2. Stopień oryginalności problemu naukowego oraz opracowanej metody jego rozwiązania oceniam na dobrym poziomie. Biorąc pod uwagę całość rozprawy doktorskiej stwierdzam, że ogólny poziom wiedzy teoretycznej Doktoranta w przedmiotowej dyscyplinie naukowej jest bardzo dobry.
3. Podsumowując, opiniowana rozprawa mgr. inż. Jakuba Białka pt. *Wyjaśnianie predykcji i szacowanie wpływu dryfu danych na jakość modeli Ucznia Maszynowego prognozujących zapotrzebowanie na energię na przykładzie modelu prognozującego zapotrzebowanie na ciepło w Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej* spełnia warunki stawiane pracom doktorskim w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.). **Wnioskuje do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej o przyjęcie rozprawy oraz jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

