

Dr hab. inż. Janusz Lichota, prof. PWr
Politechnika Wroclawska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny W9
Katedra Inżynierii Konwersji Energii

Wrocław 20 I 2025

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Machała pt.
*„Prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną i
gaz w firmie TAURON Sprzedaż sp. z o.o. w horyzoncie
krótkoterminowym”*
dla

Rady Naukowej Dyscypliny
Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka
Politechniki ŚLĄSKIEJ

Promotor rozprawy : **dr hab. inż. Leszek Remiorz, prof. PŚ**

Podstawa opracowania recenzji :

pismo przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny
Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka
Prof. dr hab. Krzysztofa Labusa
RIE-BD.512.55.2024 z dnia 30.12.2024 r.

Przedłożona do recenzji rozprawa ma 134 strony.

Wnioskowana dyscyplina naukowa:

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA

Spis treści

1. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata.....	4
2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej.....	5
3. Ocena układu rozprawy doktorskiej w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych.....	7
4. Sposób badań, w tym wybór metod analitycznych i przybliżonych. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych.....	9
5. Element nowości naukowej.....	11
6. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań.....	12
7. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań...	13
8. Oryginalność pracy i ogólna wiedza teoretyczna kandydata.....	14
8.1. Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.....	14
8.2. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.....	14
9. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej.....	15
10. Uwagi i pytania do pracy.....	16
10.1. Zauważone problemy ze stylem zdań.....	16
10.2. Użycie pojęć.....	17
10.3. Pytania problemowe.....	18
11. Wniosek.....	20

1. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata

Jako cel pracy autor podaje :

Jako główny cel badań przyjęto opracowanie i wdrożenie efektywnej metody prognostycznej, połączonej z opracowaniem skutecznego algorytmu krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną i gaz ziemny. Jako miarę oceny jakości nowej metody przyjęto poprawę trafności jej prognoz w stosunku do aktualnie używanych metod.

Cel pracy

Głównym celem pracy jest opracowanie i wdrożenie efektywnej metody prognostycznej do krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną i gaz ziemny dla firmy TAURON Sprzedaż sp. z o.o. Cel ten obejmuje: opracowanie nowej metody prognostycznej, która będzie bardziej trafna niż dotychczas stosowane metody, zidentyfikowanie przyczyn błędów w obecnych prognozach i wskazanie metod ich redukcji.

W pracy przyjęto również cele szczegółowe, takie jak: określenie czynników wpływających na zapotrzebowanie na energię, analiza wpływu generacji z OZE na prognozy zapotrzebowania, ocena wpływu błędów prognoz meteorologicznych na prognozy zapotrzebowania, optymalizacja agregacji danych historycznych i ocena metod prognoz zagregowanych i zdezagregowanych, oszacowanie kosztów związanych z niedokładnością prognoz.

Ocena celu pracy

Cel pracy jest istotny, ponieważ prognozowanie zapotrzebowania na energię jest kluczowe dla efektywnego zarządzania zasobami energetycznymi, optymalizacji kosztów i zapewnienia stabilności dostaw energii elektrycznej. Badania te mają bezpośrednie zastosowanie praktyczne dla spółki TAURON, jednego z głównych sprzedawców energii w Polsce, co zwiększa ich wartość zarówno praktyczną, jak i naukową. Praca stawia sobie za zadanie nie tylko analizę obecnych metod, ale i opracowanie nowych, co sugeruje innowacyjne podejście do problemu. Włączenie wpływu odnawialnych źródeł energii, a zwłaszcza fotowoltaiki, w modelowanie prognozy zapotrzebowania jest szczególnie istotne w kontekście dynamicznie zmieniającego się w ciągu dnia rynku energii. Cel pracy obejmuje wiele aspektów, od analizy danych pogodowych, przez zachowania konsumentów, po złożone modele statystyczne i analizowane w dalszej części pracy algorytmy uczenia maszynowego, co pokazuje, że praca jest interdyscyplinarna. Cele szczegółowe są dobrze określone, co ułatwiło planowanie i realizację badań.

2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

1. Znaczenie piśmiennictwa dla tematu rozprawy

Większość cytowanej literatury jest bezpośrednio związana z prognozowaniem zapotrzebowania na energię elektryczną i gaz w krótkim horyzoncie czasowym, z naciskiem na metody statystyczne, modele AI oraz analizę danych w kontekście energetyki. Prace takie jak [2, 8, 13, 18, 37, 66, 78, 80, 97, 100] bezpośrednio dotyczą prognozowania zapotrzebowania na energię, co jest centralnym tematem rozprawy. Artykuły [9, 19, 21, 22, 23, 24, 29, 38, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 51, 52, 53, 54, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 81, 83, 101, 108, 115, 116, 117, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 128, 129] pokazują, że autor starannie dobrał materiały, które są kluczowe dla zrozumienia metod prognozowania, wpływu zmiennych zewnętrznych oraz zastosowania nowoczesnych technologii jak AI i ML w energetyce.

2. Różnorodność źródeł

Piśmiennictwo obejmuje szeroki zakres od klasycznych metod statystycznych (ARIMA, regresja) do nowoczesnych technik bazujących na uczeniu maszynowym i sieciach neuronowych. Widać także zainteresowanie prognozami zarówno dla energii elektrycznej, jak i gazu, co wskazuje na holistyczne podejście do tematu. Wykorzystano zarówno prace naukowych z czasopism (np. "Applied Energy", "Energy Economics", "Renewable and Sustainable Energy Reviews"), jak i konferencji naukowych oraz raportów.

3. Prace niepasujące do tematu

[3]: Dotyczy autokonsumpcji energii elektrycznej u prosumenta, co jest powiązane z tematem, ale bardziej specyficzne dla prosumentów niż prognozowanie popytu na szerszą skalę.

[4]: Badanie wpływu promieniowania słonecznego na panele fotowoltaiczne jest interesujące, ale bardziej dotyczy wydajności systemów fotowoltaicznych niż bezpośrednio prognozowania zapotrzebowania na energię.

[5]: Kongres dotyczy energetyki, ale brak bezpośredniego odniesienia do prognozowania popytu.

[6]: Program "Czyste Powietrze" dotyczy finansowania źródeł ciepła, co jest mniej istotne w kontekście prognozowania zużycia energii elektrycznej i gazu.

[7]: Strona TGE może być źródłem danych cenowych, ale jej bezpośrednie powiązanie z prognozowaniem popytu jest ograniczone.

[39]: Dotyczy modelowania predykcyjnego, ale w kontekście ogólniejszym niż energetyczny.

[40]: żurnal „Educational and Psychological Measurement” nie jest specyficznie skoncentrowany na energetyce.

[55]: Słownik rynku energii może być przydatny jako referencja, ale nie jest bezpośrednio związany z prognozowaniem popytu.

[56, 57, 58]: Dotyczą modelowania promieniowania słonecznego, co jest bardziej związane z generacją energii niż z jej zapotrzebowaniem.

[102, 103, 104, 105]: Analizy systemów energetycznych z wykorzystaniem OZE, co jest pokrewne, ale nie bezpośrednio dotyczące prognozowania popytu.

[106, 107]: Analiza wpływu pandemii na zużycie energii, co może być ciekawe, ale niekoniecznie kluczowe dla tematu pracy.

[108]: Liberalizacja rynku energii, co jest szerszym kontekstem ekonomicznym.

3. Podział bibliografii na odpowiednie kategorie tematyczne, z oceną, czy prace te reprezentują szeroki zakres poglądów na temat prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną i gaz w horyzoncie krótkoterminowym:

3.1. Metody statystyczne i modelowanie (ARIMA, regresja i analiza szeregów czasowych) są zawarte w pracach [8, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66]. Prace te obejmują klasyczne podejścia do prognozowania. Jest jednak pewna tendencja do skupienia się na ARIMA.

3.2. Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe (neural networks, deep learning, machine learning: [9, 22, 23, 24, 38, 41, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 101, 116, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 129]. W tej kategorii jest bardzo szerokie spektrum podejść, od podstawowych sieci neuronowych do zaawansowanych modeli głębokiego uczenia, co sugeruje, że autor zbadał różnorodne metody AI i ML w kontekście prognozowania energetycznego.

3.3. Prognozowanie popytu na energię elektryczną: [2, 13, 18, 19, 29, 37, 97, 100, 115, 117]. Te prace koncentrują się specyficznie na prognozowaniu popytu na energię elektryczną, w tym ze strony odnawialnych źródeł energii. Pokazują one różnorodność podejść, od analizy wpływu prosumentów po wpływ zmiennych pogodowych.

3.4. Prognozowanie popytu na gaz: [43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 119, 123]. Liczba prac związanych z gazem jest mniejsza, obejmuje różne metody, od modelowania statystycznego po zastosowanie AI.

3.5. Wpływ pogody, temperatury i czynników ekonomicznych na popyt energetyczny: [25, 26, 27, 87, 88].

3.6. Prosumenci i systemy energetyczne: [3, 33, 34, 35, 36, 89, 90, 91, 92, 94, 95, 96, 97]. Publikacje koncentrują się na roli prosumentów i nowych modelach zarządzania energią, co jest istotne w kontekście zmian w systemach energetycznych.

Piśmiennictwo jest dobrze dobrane pod kątem metod prognozowania. Można poprawić jego precyzyjność poprzez wyeliminowanie mniej istotnych prac oraz dodanie bardziej specyficznych badań dotyczących prognozowania gazu.

3. Ocena układu rozprawy doktorskiej w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Rozprawa doktorska jest dobrze zorganizowana, z wyraźnym podziałem na rozdziały, od podstaw tematu, przez przegląd literatury, do szczegółowych metod badawczych i wyników, kończąc na podsumowaniu i propozycjach dalszych badań. Poszczególne części składowe to:

- wstęp (str. 13-17) z uzasadnieniem podjęcia tematu (1.1),
- cel badań i zakres pracy (1.2) definiujący cele badawcze,
- aktualny stan wiedzy (str. 18-38) obejmujący następujące podsekcje
 - charakterystyka handlu energią w Polsce (2.1),
 - techniki prognozowania i analizy danych (2.2),
 - prognozowanie zapotrzebowania na gaz (2.3),
 - stosowane metody i modele (2.4) omawiające różne techniki, w tym regresji liniowej, modeli uczenia maszynowego, metod naiwnych, dnia podobnego i modeli generacji PV,
 - budowa modelu (2.5),
 - dobór zmiennych objaśniających (2.6) oraz omówienie czynników wpływających na prognozy,

- metryki używane do oceny modeli (2.7)
- czynniki wpływające na jakość prognoz (str. 39-61). Sekcje od 3.1 do 3.8 analizują różne zmienne i ich wpływ na dokładność prognoz,
- metodyka generacji profilu zapotrzebowania brutto (str. 62-83), zawierająca historyczny profil zapotrzebowania (4.1), współczynnik zmienności (4.2), model sieci neuronowej (4.3, 4.4), wyniki algorytmu (4.5),
- prognozy z wykorzystaniem metody brutto (str. 84-109),
- podsumowanie i wnioski końcowe (str. 111-113).

Układ jest logiczny i kompletny, obejmuje wszystkie niezbędne elementy rozprawy doktorskiej, od wprowadzenia do propozycji dalszych badań. Praca szczegółowo analizuje różne aspekty prognozowania. Przejście od analizy teoretycznej do praktycznego zastosowania modeli jest dobrze pokazane. Wyniki są nie tylko teoretyczne ale i praktyczne, co jest kluczowe dla pracy w kontekście biznesowym.

4. Sposób badań, w tym wybór metod analitycznych i przybliżonych. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

W pracy przeprowadzono analizę danych historycznych obejmującą analizę trendów i sezonowości zapotrzebowania na energię. Wskazano, że trendy mogą być zakłócane przez wydarzenia niespodziewane, co jest ważne w prognozowaniu krótkoterminowym.

Praca korzysta z różnorodnych metod prognozowania, w tym metod przyczynowo - skutkowych, co jest odpowiednie dla prognoz krótkoterminowych. Uwzględniono wpływ zmiennych takich jak pogoda, ceny energii czy aktywność gospodarcza. Wprowadzono metodę pośrednią i bezpośrednią do prognozowania zapotrzebowania u prosumentów, co jest innowacyjne i odpowiada na potrzeby zmieniającego się rynku energii z coraz większym udziałem OZE.

Omówione i zastosowane metody analityczne i przybliżone obejmują regresję liniową i ARIMA, uczenie maszynowe i sieci neuronowe, metody naiwne i metody dnia podobnego. Praca wykorzystuje wiele metod, co pozwala na kompleksowe podejście do problemu prognozowania. Każda metoda jest odpowiednio dobrana do aspektu badania. Metody są wybrane nie tylko ze względu na ich naukową wartość, ale również na praktyczne zastosowanie w kontekście biznesowym. Włączenie nowoczesnych technik AI i ML, a także specjalistycznych modeli dla OZE, pokazuje, że praca nie ogranicza się do standardowych metod, ale poszukuje nowych rozwiązań. Użycie różnych metryk do oceny modeli (MAE, RMSE, R^2) zapewnia kompleksową ocenę ich dokładności i przydatności, co jest kluczowe dla naukowej rzetelności.

Przydatne byłoby bardziej szczegółowe omówienie ograniczeń każdej z zastosowanych metod, a także bardziej wyraźne wskazanie, jak te metody radzą sobie z niepewnością i zmiennością danych w kontekście krótkoterminowego prognozowania.

W rozdziale „3.1 Źródła fotowoltaiczne” przedstawiono dynamiczny wzrost mocy zainstalowanej w instalacjach PV. Wzrost o ponad 2000% w ciągu czterech lat jest znaczący i wskazuje na potrzebę dokładnego monitorowania i uwzględnienia tego trendu w prognozach energetycznych. Autor identyfikuje kluczowe czynniki wzrostu rynku PV, takie jak regulacje prawne, programy dofinansowania, spadek cen i świadomość ekologiczna. W rozdziale „3.2 Prosumenci – generacja „za licznikiem”” wyjaśniono wyzwania związane z generacją energii przez prosumentów, zwłaszcza w kontekście braku dostępu do danych o rzeczywistej generacji. Zaproponowano rozwiązanie polegające na wprowadzeniu metodologii szacowania generacji PV na

podstawie różnicy między profilem brutto a netto. W rozdziale „3.3 Promieniowanie słoneczne” zilustrowano zależność między generacją PV a promieniowaniem słonecznym. W rozdziale „3.4 Pompy ciepła” przedstawiono dane na temat wzrostu instalacji pomp oraz pokazano wpływ pomp ciepła na zużycie energii, zwłaszcza w niskich temperaturach. W rozdziale „3.5 Sezonowość” pokazano wpływ sezonowości na zapotrzebowanie na energię elektryczną, uwzględniając zarówno cykle dzienne, tygodniowe, jak i roczne. W rozdziale „3.6 Inne czynniki wpływające na zmienność zapotrzebowania” uwzględniono m.in. nowe mechanizmy bilansowania systemu elektroenergetycznego. W rozdziale „3.7 Agregacja danych odbiorców” opisano metodę agregacji danych w celu ujednoczenia podejścia do prognozowania w dużej skali. Wprowadzenie wag geograficznych i mocy zainstalowanej jest dobrze uzasadnione. W rozdziale „3.8 Agregacja zmiennych objaśniających” zaprezentowano podejście do agregacji prognoz meteorologicznych z uwzględnieniem mocy zainstalowanej pokazując.

Rozdział 3 pokazuje zrozumienie przez autora wielu czynników wpływających na prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną i gaz. Metody szacowania generacji PV i agregacji danych są innowacyjne i odpowiadają na aktualne wyzwania w sektorze energetycznym oraz mają bezpośrednie zastosowanie w praktyce. Brakuje bardziej szczegółowego omówienia ograniczeń metodologii, wpływu zmieniających się warunków rynkowych i regulacyjnych na dokładność prognoz.

W rozdziale „4.1 Historyczny profil zapotrzebowania brutto” wprowadzono metodę generacji brutto. Rozdziela ona wpływ generacji PV na profil zapotrzebowania wyodrębniając udział odnawialnych źródeł energii. Do estymacji wybrano sztuczne sieci neuronowe. Uczenie przeprowadzono na danych historycznych z lat 2016-2019. W rozdziale „4.2 Współczynnik zmienności” wyjaśniono, jak generacja PV wpływa na zmienność zapotrzebowania na energię elektryczną. Wykorzystano współczynnik zmienności do analizy zmienności zapotrzebowania porównując zmienność między różnymi okresami lub regionami. W rozdziale „4.3 Model sieci neuronowej” opisano strukturę modelu neuronowego. Jako wejścia wybrano dane kalendarzowe, pogodowe i historyczne zapotrzebowanie mające wpływ na zużycie energii. W rozdziale „4.4 Wyniki uczenia sieci neuronowej” przedstawiono proces uczenia pokazując spadek błędu MSE. Wysokie wartości współczynnika determinacji R^2 wskazują na dobre dopasowanie modelu do danych. Zauważono o potrzebę unikania przeuczenia (ang. *overfitting*) i monitorowania gradientu spadku błędu uczenia. W rozdziale „4.5 Wyniki algorytmu” znajdują się wykresy pokazujące różnice między profilami brutto a netto, ilustracja wpływu generacji PV na profil zapotrzebowania oraz definicja i obliczenie wskaźnika autokonsumpcji instalacji PV są dobrze opisane. Rozdział podaje metodę rozwiązania realnych zadań dla operatorów sieci.

5. Element nowości naukowej

Element nowości naukowej w tej pracy polega na wprowadzeniu innowacyjnych metod doboru zmiennych, agregacji danych, oraz zastosowaniu hybrydowych modeli prognostycznych, które mają bezpośrednie praktyczne zastosowanie, przy jednoczesnym wskazaniu nowych kierunków rozwoju badań w tej dziedzinie. Jako zmienne wejściowe do sztucznej sieci neuronowej dobrano szeregi czasowe w formie ułamków doby, miesiąca, roku, średnią godzinową temperaturę, temperaturę maksymalną i minimalną w dobie, historyczne średnie, minimalne i maksymalne zapotrzebowanie na energię elektryczną z poprzednich okresów odniesione do temperatury. Modelowano przyszłe zapotrzebowanie na energię elektryczną w wybranych przez autora obszarach zasilania. Przyszłe zapotrzebowanie zdekomponowano na składowe zapotrzebowania brutto i osobne z generacji PV.

Podjęto próbę opracowania nowej metody, nazwanej metodą generacji brutto. Kluczowym elementem tej metody jest oddzielenie składowej zapotrzebowania związanej z generacją PV i odtworzenia profilu zapotrzebowania bez udziału mikroinstalacji fotowoltaicznych. Schematycznie pokazano to na rysunku 4.1.

W zakończeniu podkreślono aspekty nowości wprowadzone w ramach badań, takie jak poprawa efektywności prognoz krótkoterminowych, optymalizacja doboru zmiennych predykcyjnych oraz zastosowanie nowych metod agregacji danych, które mogą znaleźć praktyczne zastosowanie zarówno na poziomie operatorów systemu, jak i uczestników rynku energii.

Własną agregację danych zrobiono ze względu na położenie geograficzne odbiorców oraz poklasteryzowano odbiorców mających mikroinstalacje fotowoltaiczne. Wybór zmiennych objaśniających uwzględnia złożone interakcje między różnymi czynnikami wpływającymi na zapotrzebowanie na energię, takimi jak temperatura, nasłonecznienie, czy wzorce konsumpcji energii. Zastosowanie metod hybrydowych pozwala na wykorzystanie mocnych stron różnych podejść do prognozowania, co skutkuje osiągnięciem wyników z wysokim współczynnikiem determinacji np. wynoszącym około 0,85 dla modelu OPvEnsemble, wskazując na skuteczność tej metodologii. Praktyczne zastosowanie wyników badań w firmie TAURON Sprzedaż sp. z o.o. poprzez wdrożenie nowej metody prognozowania równoległe z dotychczasowymi metodami stanowi element nowości potwierdzając empirycznie wartość naukową tych badań w realnym środowisku.

6. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

W rozdziale „5.1 Mikrogeneracja – wyniki prognoz” przedstawiono rozkład błędów prognoz generacji PV. Histogramy błędów pokazują normalny rozkład ze skupieniem wokół zera, co sugeruje, że model jest dobrze skalibrowany, choć z wyraźnymi outlierami, które wymagają uwagi. Analiza dobowa i miesięczna pokazuje, jak zmienność generacji PV wpływa na dokładność prognoz, szczególnie w godzinach o mniejszym nasłonecznieniu i w zimie, gdy warunki są bardziej nieprzewidywalne. Wybór modelu Ensemble dla obszaru 3, ze względu na najwyższy współczynnik R^2 i najniższe wartości RMSE i MAE, jest dobrze uzasadniony, wskazując na jego użyteczność w wyjaśnianiu zmienności danych. W rozdziale „5.2 Zapotrzebowanie brutto – wyniki prognoz” porównano różne modele (Ensemble, XGBoost, metoda naiwna) do prognozowania zapotrzebowania brutto pokazując, że model hybrydowy (Ensemble) jest najbardziej dokładny. Analiza autokorelacji reszt wskazała na potrzebę dalszego modelowania sezonowości i cykliczności w danych. W rozdziale „5.3 Suma składowych – wyniki prognoz” pokazano, że metoda brutto, która oddziela generację PV od zapotrzebowania netto, przynosi lepsze rezultaty niż prognozowanie na danych netto, co jest ważne dla zrozumienia, jak lepiej modelować systemy z wysokim udziałem OZE. W rozdziale „5.4 Wybór prognoz meteorologicznych” zbadano korelację pomiędzy prognozami natężenia promieniowania słonecznego a generacją PV. Wyniki wskazują na wyższość modeli komercyjnych, zwłaszcza komercyjnego modelu DTN. Przeprowadzono analizę wariancji (funkcja matlaba ANOVA) dla oceny różnych prognoz meteorologicznych. W rozdziale „5.5 Zmienność danych rzeczywistych zapotrzebowania na energię elektryczną” podkreślono istotność kontroli jakości danych wejściowych do modeli prognozujących oraz wskazano na problemy z danymi dostarczonymi przez OSD, szczególnie w krótkich okresach. W rozdziale „5.6 Koszty odchylenia prognoz” omówiono koszty związane z niedokładnością prognoz oraz jak niedoszacowanie i przeszacowanie wpływają na koszty bilansowania. Porównano koszty bilansowania między metodą brutto a referencyjną i pokazano praktyczne korzyści finansowe z zastosowania nowej metody.

Praca jest kompleksowa pokazując techniczne i ekonomiczne konsekwencje prognozowania zapotrzebowania na energię. Wyniki analiz błędów i korelacji są dobrze udokumentowane, co pozwala na ocenę dokładności stosowanych modeli. Praca ma bezpośrednie zastosowanie w praktyce w kontekście zarządzania energią i bilansowania systemu. Warto jednak zauważyć, że mogłoby być więcej szczegółowej analizy dotyczącej tego, jak można dalej optymalizować modele w kontekście zmieniających się warunków pogodowych i rynkowych, oraz jak radzić sobie z outlierami w danych.

7. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Autor napisał, że zastosował swoje wyniki w praktyce.

Projekt prognozowania został pomyślnie **wdrożony** w spółce obrotu. Prognozy realizowane są równolegle według dotychczasowej metody oraz metody wypracowanej w ramach doktoratu **wdrożeniowego**. Wyniki pokazały, że metoda zaproponowana w projekcie badawczym osiąga postęp w stosunku do innych metod, wykonywanych w podobnych warunkach. Wyniki testów **wdrożeniowych** wskazują na skuteczność zastosowanych metod, biorąc jednak pod uwagę ciągłe i dynamiczne zmiany na rynku energii, rekomendowane są dalsze badania nad doskonaleniem modeli prognozowania.

Wyniki badań potencjalnie umożliwiają dokładniejsze prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną i gaz, co pozwala spółkom obrotu jak np. TAURON Sprzedaż na lepsze zarządzanie zakupami i sprzedażą energii na rynku dnia następnego (RDN) oraz na rynku bilansującym wraz z potencjalnymi konsekwencjami polegającymi na : optymalizacji kosztów zakupu energii, minimalizacji strat finansowych związanych z niebilansowaniem, zarządzanie generacją odnawialnych źródeł energii (OZE), wykorzystaniem arbitrażu, zarządzanie ryzykiem i innymi.

8. Oryginalność pracy i ogólna wiedza teoretyczna kandydata

8.1. Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Elementy oryginalności w rozprawie obejmują : opracowanie metody generacji brutto, wykorzystanie sieci neuronowych o głębokiej strukturze, metod uczenia maszynowego (np. XGBoost) oraz hybrydowych modeli do prognozowania z własnym zbiorem zmiennych objaśniających. Wprowadzono nowe metody i techniki prognozowania zapotrzebowania na energię, które są specjalnie dostosowane do zmieniających się warunków rynkowych, w szczególności do wzrostu generacji z mikroinstalacji PV.

8.2. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej

1. Wiedza teoretyczna

Autor opanował m.in. następujące pojęcia : ARIMA, regresja liniowa z wieloma zmiennymi, głębokie sieci neuronowe, gradient boost, wybór predyktorów w modelach regresji, kryterium informacyjne Akaike'a. Wykazuje on zrozumienie sposobu działania rynku energii, w tym jego struktury, elementów regulacji prawnych, oraz mechanizmów handlowych, jak RDN (Rynek Dnia Następnego) i rynek bilansujący. Poruszono temat wpływu generacji rozproszonej na system elektroenergetyczny oraz problemów związanych z autokonsumpcją i oddawaniem energii do sieci. Wykazano umiejętność analizy dużych zbiorów danych, agregacji danych, oraz stosowania odpowiednich metryk do oceny modeli prognozujących.

2. Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Autor zaprojektował i wdrożył nowe metody prognozowania, które zostały praktycznie zastosowane w spółce energetycznej. To świadczy o zdolności do samodzielnego prowadzenia badań od koncepcji do wdrożenia.

Umieścił on swoją pracę w kontekście istniejącej wiedzy wykazując się znajomością literatury naukowej.

9. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

Na podstawie przedstawionych tekstów nie ma wyraźnych wskazówek na konkretne nieprawidłowości w ocenianej rozprawie doktorskiej. Jednak można zidentyfikować kilka potencjalnych obszarów, gdzie mogłyby wystąpić pewne braki lub niedoskonałości:

- zmienność i błędy w prognozach dla okresów niskiego nasłonecznienia

W miesiącach styczniu i lutym prognozy są znacznie mniej stabilne i bardziej narażone na duże błędy. Dzień jest krótki, ilość promieniowania słonecznego, która dociera do

- błędy systematyczne w godzinach porannych i wieczornych

Większe rozrzuty i większa liczba outlierów obserwuje się wcześniej rano (np. godzina 5) oraz późnym popołudniem (godzina 19), co sugeruje większą zmienność i trudności w prognozowaniu generacji PV w tych porach. Może to być spowodowane specyficznymi

- autokorelacja reszt

idealnie ze sobą skorelowane (co jest normalne przy opóźnieniu 0). Niska autokorelacja reszt jest pożądana, ponieważ oznacza, że model dobrze prognozuje zmienne i nie pozostawia żadnych systematycznych wzorców błędów. W badanych modelach każdy wykazywał wysokie poziomy autokorelacji do 72 opóźnienia. To jest dość częsty

Te punkty niekoniecznie oznaczają, że rozprawa zawiera błędy metodologiczne czy naukowe. Raczej wskazują na obszary, w których model lub metoda mogłyby być ulepszone, aby zwiększyć dokładność i stabilność prognoz.

10. Uwagi i pytania do pracy

10.1. Zauważone problemy ze stylem zdań

Aby model dokładnie prognozował zapotrzebowanie na energię elektryczną, należy zintegrować w nim historyczne dane pogodowe i dane o zapotrzebowaniu na energię elektryczną. Aby model prognostyczny mógł być użyteczny, należy zasilić go

dostęp odbiorcom do różnych ofert rynkowych. Sprzedawców energii elektrycznej zachęciło do konkutowania o odbiorców na wolnym rynku. Liberalizacja rynku energii

dowolnego miesiąca. Klienci są rozproszeni po całym kraju, dlatego należy ich zareagować, uwzględniając lokalizację geograficzną. Największy wpływ na

zareagować, uwzględniając lokalizację geograficzną. Największy wpływ na zapotrzebowanie na energię elektryczną ma temperatura. Z kolei największy wpływ na

Temperatura ?

wymogów Dyrektyw Unijnych. Spółła obrotu jest jednym z największych sprzedawców

agregowane. Ostateczna prognoza jest podstawą do zakupu\sprzedaży odpowiedniej ilości na rynku spot.

- określenie czynników wpływających na poziom zapotrzebowania na energię elektryczną i gaz,

- modele boxa Jenkinsa – ARIMA,

Piąty etap obejmuje walidację wytrenowanych modeli, aby lepiej ocenić stabilność

pozostawia żadnych systematycznych wzorców błędów. W badanych modelach każdy wykazywał wysokie poziomy autokorelacji do 72 opóźnień. To jest dość częsty

Autor ma na myśli 72 godziny ?

Współczynnik korelacji zmiennej objaśnianej i zmiennej objaśniającej określa, czy istnieje liniowa zależność pomiędzy jedną a drugą zmiennymi. Badane były zarówno

10.2. Użycie pojęć

Autor używa nieprecyzyjnie pojęcia optymalizacji. Optymalizacja w kontekście matematycznym oznacza proces znajdowania najlepszego rozwiązania (minimum lub maksimum) danej funkcji w określonym zbiorze możliwych rozwiązań. Przykłady

35:

b) **optymalizacja** parametrów, w tym dostosowywanie hiperparametrów modelu za pomocą takich metod, jak grid search czy random search,

Str. 113

Opracowane podejście, w opinii Autora, wnosi element oryginalnego rozwiązania, wprowadzającego **optymalizację** doboru zmiennych objaśniających oraz zastosowanie nowych metod agregacji danych. Znajduje to praktyczne zastosowanie zarówno na

Nie udowodniono, że zbiór zmiennych objaśniających jest optymalny. Przykładowo nie analizowano zwyczajów mieszkańców związanych z c.w.u., co ma wpływ na generację energii elektrycznej w funkcji czasu.

- **wyznaczenie optymalnych parametrów agregacji danych historycznych oraz ocena metody prognozy zagregowanej oraz zdezagregowanej,**

Kryterium optymalizacji? Brakuje w pracy. „Określenie miary agregacji” byłoby lepszym określeniem.

10.3. Pytania problemowe

1. Jak można poprawić dokładność prognozowania zapotrzebowania na energię w miesiącach zimowych, kiedy generacja fotowoltaiczna jest niska?
2. W jaki sposób zmienność generacji PV w godzinach porannych i wieczornych wpływa na dokładność modeli prognozujących i jakie metody mogą zredukować tę zmienność?
3. Czy wysoka autokorelacja reszt w modelach prognozujących zapotrzebowanie na energię sugeruje konieczność wprowadzenia dodatkowych zmiennych objaśniających, aby lepiej uchwycić sezonowość?
4. Jakie są potencjalne konsekwencje ekonomiczne dla spółek energetycznych wynikające z niedokładności prognoz generacji PV, szczególnie w kontekście kosztów bilansowania?
5. Jak można zoptymalizować proces agregacji danych pogodowych, aby lepiej dopasować prognozy natężenia promieniowania słonecznego GHI do rzeczywistej generacji z instalacji fotowoltaicznych?
6. W jakim stopniu niepewność w prognozach meteorologicznych dotyczących natężenia promieniowania słonecznego wpływa na dokładność modeli prognozowania zapotrzebowania na energię?
7. Jakie strategie można zastosować, aby zminimalizować wpływ błędnych danych historycznych na prognozy krótkoterminowe?
8. Czy istnieją metody, które mogłyby zwiększyć współczynnik autokonsumpcji energii z mikroinstalacji PV, aby zmniejszyć fluktuacje zapotrzebowania netto?
9. Jakie są potencjalne implikacje dla sieci energetycznej wynikające ze wzrostu liczby prosumentów i jak można je zrównoważyć poprzez lepsze modele prognozowania?
10. Czy wprowadzenie magazynów energii mogłoby poprawić dokładność prognozowania zapotrzebowania netto na energię, i jakie wyzwania wiążą się z ich integracją w istniejących modelach?

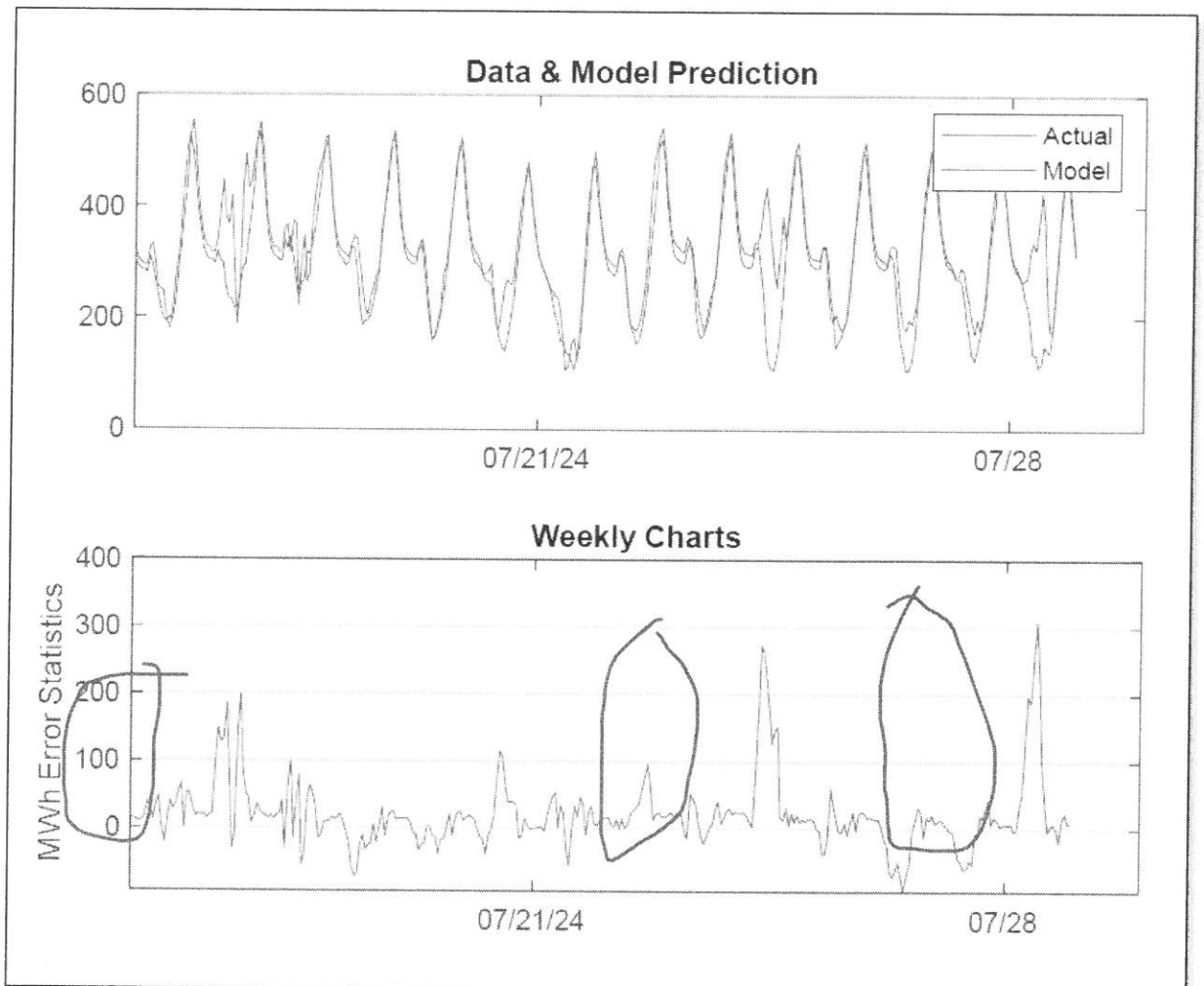
11. Po co użyto pięć warstw ukrytych zamiast jednej (tw. Cybenki) ?

Sieć neuronowa składa się z 5 ukrytych warstw, z każdą warstwą zawierającą 10 neuronów, co przedstawiono na rysunku 4.4

12. Nie pokazano zmiennych wejściowych do sztucznej sieci neuronowej, nawet w załączniku (rozdział 4.3). To by ułatwiło ocenę jakości dobranych danych uczących.

13. W jaki sposób przeprowadzono hybrydyzację modeli ?

14. Co mogło być powodem tych pików odchyień ?



11. Wniosek

Autor rozprawy – mgr inż. Paweł Machała – spełnia **art. 187** Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. Zm.).

Art. 186. 1. Stopień doktora nadaje się osobie, która:

2023-10-19

Kancelaria Sejmu s. 109/262

- 1) posiada tytuł zawodowy magistra, magistra inżyniera albo równorzędny lub posiada dyplom, o którym mowa w art. 326 ust. 2 pkt 2 lub art. 327 ust. 2, dający prawo do ubiegania się o nadanie stopnia doktora w państwie, w którego systemie szkolnictwa wyższego działa uczelnia, która go wydała;
- 2) uzyskała efekty uczenia się dla kwalifikacji na poziomie 8 PRK, przy czym efekty uczenia się w zakresie znajomości nowożytnego języka obcego są potwierdzone certyfikatem lub dyplomem ukończenia studiów, poświadczającymi znajomość tego języka na poziomie biegłości językowej co najmniej B2;
- 3) posiada w dorobku co najmniej:
 - a) 1 artykuł naukowy opublikowany w czasopiśmie naukowym lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej, które w roku opublikowania artykułu w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. b, lub
 - b) 1 monografię naukową wydaną przez wydawnictwo, które w roku opublikowania monografii w ostatecznej formie było ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. a, albo rozdział w takiej monografii, lub

Kancelaria Sejmu s. 110/262

Art. 187. 1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.

2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.

3. Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.

4. Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim. W przypadku gdy rozprawa doktorska nie jest pracą pisemną, dołącza się opis w językach polskim i angielskim.

W szczególności :

- „prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej”,
- przedstawił „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej”
- rozprawa doktorska jest w formie pisemnej,
- w rozprawie znajduje się streszczenie w języku angielskim i polskim.

Dorobek spełnia warunek podany w **art. 186 1. 3) a)** ustawy o stopniach naukowych tj. obejmuje 4 (słownie: cztery) pozycje traktowane jako publikacja.

W związku z powyższym rozprawa spełnia warunki zapisane w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dział V Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki, rozdział 2. i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Lichota. Janusz

Lichota. Janusz

dr hab. inż. Janusz Lichota, prof. PWr