

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

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Pawła Machała,
zatytułowanej „*Prognostowanie zapotrzebowania na energię elektryczną i gaz
w firmie TAURON Sprzedaż sp. z o.o. w horyzoncie krótkoterminowym*”

1. Podstawa formalna. Sylwetka Doktoranta

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 30.12.2024 r. w wyniku uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka tej uczelni z dnia 19.12.2024 r. Rozprawa powstała w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy. Doktorant jest pracownikiem firmy TAURON Sprzedaż, w której przeprowadził badania.

2. Cel pracy, zasadność podjęcia tematu

W przedstawionej do oceny pracy zadaniem podjętym przez Doktoranta, sformułowanym jako główny jej cel, było opracowanie i wdrożenie efektywnej metody prognostycznej, połączonej z opracowaniem skutecznego algorytmu krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną i gaz ziemny. Jest to zadanie bardzo istotne dla efektywnej działalności pracodawcy mgr inż. Pawła Machała - firmy Tauron Sprzedaż. Dotyczy ono również wyzwań dla wszystkich uczestników rynku obrotu, w szczególności obrotu energią elektryczną.

W ostatnich kilku latach mamy do czynienia z niezwykle intensywnym rozwojem energetyki rozproszonej, w szczególności prosumenckiej. Jest to wynikiem powstania atrakcyjnych warunków finansowych dla tej kategorii uczestników rynku energii, będących wynikiem splotu kilku kluczowych czynników. W ostatnich latach doszło do bardzo intensywnej (ponad dziesięciokrotnej na jednostkę mocy) redukcji kosztów paneli fotowoltaicznych. Stworzone zostały warunki prawne i finansowe dla funkcjonowania energetyki prosumenckiej. Tworzony jest coraz bardziej intensywny nacisk na rozwój odnawialnych źródeł energii, w znacznej mierze adresowany do tych charakteryzujących się dużą dynamiką, zależną w szczególności od warunków pogodowych. Spowodowało to konsekwencje w postaci trudności z bilansowaniem pracy źródeł konwencjonalnych, które w warunkach pierwszeństwa w dostępie źródeł OZE do sieci podlegają w coraz większym stopniu zadaniu bilansowania podaży z popytem odbiorców, w tym prosumentów zasilanych energią odnawialną generowaną „za licznikiem”. W tej sytuacji istnieje silna potrzeba możliwie dokładnego prognozowania zmienności zapotrzebowania odbiorców na energię elektryczną. Prognozy krótkoterminowe są kluczowe dla zarządzania klasycznym majątkiem wytwórczym będącym w posiadaniu dużych wytwórców oraz dla spółek dystrybucyjnych. Prognozowanie to staje się coraz większym wyzwaniem z uwagi na zmienność generacji OZE rosnącą wraz z rozwojem źródeł OZE, w szczególności sektora prosumenckiego.

Doktorant wybrał niezwykle istotną, interesującą z inżynierskiego i naukowego punktu widzenia problematykę rozprawy, bardzo ważną dla Jego pracodawcy i stwarzającą

możliwość spełnienia potrzeb związanych z poprawą prognozowania zapotrzebowania odbiorców na energię. Politechnika Śląska, a w szczególności Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki tej uczelni to kluczowy w Polsce ośrodek akademicki, w którym rozwijane są od lat szerokie kompetencje w zakresie technologii powiązanych z energetyką. Wybór problematyki badawczej dokonany przez mgr inż. Pawła Machała wiązał się z możliwością realizacji interesującej, mającej charakter aplikacyjny pracy badawczej.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

Oceniana rozprawa została podzielona na 8 ponumerowanych rozdziałów. Jej treść uzupełniają: streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz oznaczeń i symboli, wykaz używanych skrótów, obszerny (136 pozycji) wykaz wykorzystanych źródeł literaturowych, spis rysunków i spis tabel (spisy te nie zaznaczone w spisie treści dokumentu) oraz załączniki w postaci listingów kodów opracowanych w środowisku Matlab.

Pierwszy rozdział rozprawy „Wstęp” zawiera na początku informacje dotyczące uzasadnienia podjętej tematyki, w tym wyjaśnienia roli spółek obrotu w sprzedaży energii elektrycznej oraz gazu. W tej części rozdziału przedstawiona została charakterystyka spółki zatrudniającej Doktoranta nazywanej w tu „Spółką obrotu”. W dalszej części przedstawiony został cel badań oraz (syntetycznie) zakres prac. Jako główny cel badań Doktorant przyjął: *„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”*.

W rozdziale drugim, zatytułowanym „Aktualny stan wiedzy” przedstawione zostały: charakterystyka funkcjonowania handlu energią elektryczną i gazem ziemnym w Polsce, techniki prognozowania i analizy danych historycznych, prognozowania zapotrzebowania odbiorców energii elektrycznej, w tym prosumentów i odbiorców gazu oraz przegląd stosowanych metod prognozowania. W dalszej części rozdziału przedstawione zostały etapy i związane z nimi kroki stosowane przy budowie modelu prognostycznego. Doktorant wyróżnił tu sześć kolejnych etapów, podkreślając charakter iteracyjny całości działań oraz konieczność regularnej weryfikacji dokładności oraz aktualizacji modelu. W końcowej części rozdziału omówione zostały sposoby doboru zmiennych objaśniających oraz wskaźników istotnych dla oceny prognoz dotyczących obrotu energią elektryczną.

Kolejny, trzeci rozdział rozprawy „Czynniki wpływające na jakość prognoz” dotyczy w głównej mierze charakterystyki i wpływu źródeł fotowoltaicznych, w szczególności prosumenckich na zmienność zapotrzebowania na energię elektryczną. Wskazane zostały istotne cechy instalacji pomiarowych stanowiących wyposażenie prosumentów, w szczególności brak dostępu do danych rzeczywistych dotyczących generacji energii elektrycznej u tej kategorii odbiorców, tym samym zużycia „za licznikiem”. Kolejne istotne przedstawione zagadnienia to wpływ promieniowania słonecznego na generację fotowoltaiczną oraz pomp ciepła na zużycie energii elektrycznej. Doktorant podkreślił, że znakomitą większość nowo budowanych pomp ciepła w Polsce stanowią pompy powietrzne, których istotną cechą jest intensywny spadek ich efektywności wraz ze spadkiem temperatury zewnętrznej. Kolejny omówiony w tej części pracy czynnik mający istotny wpływ na zmienność obciążenia sieci to sezonowość (zmienność dobową, tygodniową oraz sezonową). Doktorant podkreślił dodatkowy wpływ na zmienność zapotrzebowania wynikającą z wprowadzenia mechanizmów bilansowania opartych na reakcji odbiorców na sygnały cenowe

(taryf dynamicznych, usługi DSR, możliwość zmiany dostawcy energii). W końcowej części rozdziału przedstawiona została charakterystyka odbiorców rozważanej w pracy spółki obrotu. Dokonana została tu agregacja wytwórców i odbiorców ze wskazaniem dwóch płaszczyzn ich podziału: geograficznej oraz związanej z odbiorcami dysponującymi mikroinstalacjami wytwarzającymi energię elektryczną. Z uwagi na uwarunkowania wynikające ze sposobu opomiarowania instalacji prosumenckich (brak bezpośredniej wiedzy o zużyciu przez nich energii „za licznikiem”) Doktorant wskazał na konieczność agregacji opartej na podziale obszaru dystrybucji na rejony, dla których wykorzystywane są potrzebne, odpowiednio przygotowane dane pogodowe mogące stanowić podstawę do prognoz generacji fotowoltaicznej.

W rozdziale czwartym, zatytułowanym „*Metodyka generacji profilu zapotrzebowania*” przedstawiona została próba opracowania nowej metody, mającej prowadzić do odtworzenia profilu zapotrzebowania brutto. Do tego celu używane były dane historyczne odnośnie zapotrzebowania odbiorców związanego z generacją PV, będące w dyspozycji w postaci wyników pomiarów licznikowych. W postępowaniu prowadzona była także próba oddzielenia zużycia energii na potrzeby własne odbiorców oraz wyznaczenia szacowanej generacji PV. W algorytmie odtworzeniowym wykorzystana została głęboka sieć neuronowa złożona z 5 warstw ukrytych, zawierających po 10 neuronów każda. Dane zostały zagregowane do trzech obszarów obejmujących kolejno województwa: małopolskie i część śląskiego (obszar 1), dolnośląskie i opolskie (obszar 2) oraz Górny Śląsk (obszar 3). W rozdziale przedstawiono obszerną analizę wyników uczenia i walidacji sieci neuronowej. W końcowej części rozdziału zaprezentowane zostały wyniki działania przeprowadzonego postępowania uzyskane w postaci przebiegu zmienności generacji PV, energii oddanej do sieci oraz wskaźników autokonsumpcji na terenie wybranych miast. Dobór metodyki postępowania, oraz oceny wyników, a także ich użyteczność uważam za poprawne.

Rozdział piąty „*Prognozy z wykorzystaniem metody brutto*” zawiera obszerną analizę jakości wyników z wykorzystaniem różnych modeli prognostycznych. Na początku Doktorant zestawiał (w tabeli 5.1) wyniki prognoz uzyskane z wykorzystaniem różnych bibliotek uczenia maszynowego, w tym: Krzywa, XGBoost, Ensemble dla generacji PV. Analiza jakości odwzorowania zmienności danych przeprowadzona została dla trzech wymienionych obszarów, z wykorzystaniem wskazanych bibliotek, z uwzględnieniem podziału na godziny, miesiące oraz z graficzną ilustracją dla prognozy dwutygodniowej. Podobnego zestawienia Doktorant dokonał dla analizy zapotrzebowania brutto (tabela 5.2) oraz wyników najbardziej go interesujących - prognoz brutto (tabela 5.3). W dalszej części rozdziału przeprowadzone zostało porównanie prognoz meteorologicznych natężenia promieniowania słonecznego, komercyjnych (DTN ICM) oraz niekomercyjnych, na przykład IMGW czy METEOFRAŃCE z danymi rzeczywistymi. Końcowa część rozdziału została poświęcona zmienności danych rzeczywistych zapotrzebowania na energię elektryczną w aspekcie przygotowania w dobie n prognoz zapotrzebowania na dobę $n+1$ w oparciu o historyczne, zagregowane dane rzeczywiste dla odbiorców z poszczególnych analizowanych obszarów. Porównanie odchyłek danych rzeczywistych przeprowadzone zostało dla dób od $n-1$ do $n-6$ oraz $n-13$ i $n-44$. Doktorant wskazał na fakt, że dane z dób $n-1$, $n-2$ i $n-3$, jako pozyskiwane z układów pomiarowych i jeszcze nie zweryfikowane są błędne i nie nadają się do wyliczeń w modelach automatycznie generujących prognozy. W końcowej części rozdziału przedstawione zostały koszty bilansowania metody brutto i modelu referencyjnego.

Utrudnienie w lekturze i śledzeniu wyników analiz w rozdziale 5 stanowi to, że Doktorant nie zadbał, moim zdaniem, o dostatecznie precyzyjny opis wielkości na osiach poszczególnych

wykresów. Na przykład na rys. 5.1 analizowany jest przypadek obszaru 3 i rozkładu błędów: histogram dla różnicy pomiędzy wartościami rzeczywistymi i prognozowanymi, rozkład błędów bezwzględnych oraz błędów bezwzględnych procentowych. Na trzech prezentowanych na tym rysunku wykresach mamy za każdym razem różną skalę na osi poziomej. Podobnie jest z rys. 5.5, 5.9 czy 5.13, brak jest odnoszących się do tego objaśnień w tekście. Nie do końca też jasna jest informacja zamieszczona w ostatnim akapicie rozdziału o procentowej poprawie wyniku finansowego. Do jakich wartości odnosi się wskazana poprawa 80% i dalej 14 i 36%? Zakładam, że numer obszaru nie jest tu jawny, ale informacja w tym kontekście nie jest dla mnie czytelna, będę zobowiązany za stosowne wyjaśnienia.

Jednostronicowy rozdział szósty poświęcony został dodatkowym zastosowaniom metody brutto. Doktorant wskazał na możliwość zastosowania prognozowania metodą brutto również w horyzoncie długoterminowym. W rozdziale siódmym zawarto podsumowanie i wnioski końcowe. Warto podkreślić, że dokonano pomyślnego wdrożenia rezultatów pracy w spółce obrotu zatrudniającej mgr inż. Pawła Machała. Rozdział ósmy dotyczy dalszych, trafnie wytypowanych kierunków badań.

Struktura pracy stanowi poprawnie skomponowaną sekwencję zrealizowanych zadań obejmujących wszystkie istotne dla rozwiązywanego problemu elementy. Praca ma niewątpliwy charakter aplikacyjny. Poruszono oraz w znacznej mierze rozwiązano w niej, z użyciem opracowanej przez Doktoranta metodyki, istotny problem badawczy dotyczący prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną. Cel pracy został osiągnięty. Atutem rozprawy jest, obszerny przegląd literatury. Przedmiotem cytowań jest 136 pozycji, głównie opracowanych w języku angielskim. Doktorant jest współautorem czterech cytowanych prac (jedna opublikowana w czasopiśmie Rynek Energii dwie w materiałach międzynarodowych konferencji oraz jedna w czasopiśmie Energy Policy Studies), we wszystkich występuje jako pierwszy autor. Wszystkie te prace są powiązane tematycznie z rozprawą.

Obok wspomnianych zalet w rozprawie pojawiły się jednak również usterki. Są one miejscami dość liczne, choć dotyczą w głównej mierze strony redakcyjnej i mają zasadniczo charakter drobnych. Strona redakcyjna rozprawy została oceniona w kolejnym rozdziale niniejszej opinii.

3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne

Liczba zauważonych przeze mnie w trakcie lektury usterek redakcyjnych w pracy jest, jak to zostało wspomniane, miejscami dość znaczna. Sam tekst napisany został w sposób wzbudzający zainteresowanie czytelnika. Niektóre usterki wymagają komentarza objaśniającego ze strony Doktoranta. W uwagach zaznaczyłem kilka pytań z prośbami o wyjaśnienia.

Dominującą część usterek stanowią typowe literówki lub drobne potknięcia redakcyjne związane z nie do końca właściwym doбором niektórych słów. Przykłady usterek o charakterze głównie redakcyjnym przedstawiam poniżej:

- str.15, drugi akapit od góry, zdanie: „*Klienci są rozproszeni po całym kraju, dlatego należy ich zareagować, uwzględniając lokalizację geograficzną*”. Być może system autopoprawek edytora tekstu dobrał słowo „zareagować” w miejsce słowa „zagregować”;
- str.17, ostatnia linia pierwszego akapitu od góry: „*Ostateczna prognoza jest podstawą do zakupu\sprzedaży odpowiedniej ilości na rynku spot*”;

- str.26, równanie (2.1): w zapisie zabrakło, jak się wydaje zaznaczenia obecności zmiennych niezależnych pomiędzy zmienną 2 oraz zmienną n ;
- str.29, objaśnienia do równania (2.5): v_{kj} – wagi między ukrytym neuronem j a wyjściowym neuronem k . We wzorze taka wielkość nie występuje, zapewne chodzi o k_{kj} ;
- str. 40, czwarta i trzecia linia od końca: „*Bada są między innymi ograniczenia systemów energetycznych z dużym udziałem PV*”;
- str.48, trzecia i druga linia na końcu drugiego akapitu: „*Zapotrzebowanie na energię elektryczną wykazuje kilka sezonowość i okresowość*”
- str. 49, podpis pod rys. 3.9: „*Dobowe zapotrzebowanie na energię elektryczną na wybranym obszarze*”, opis osi wskazuje na zmienność godzinową w okresie wybranej doby. Na tym i następnym rysunku (3.10) warto, jak się wydaje wskazać do jakich dni tygodnia (roboczych czy świątecznych) odnosi się dana doba;
- str.55, rys.3.13, brak legendy, lub stosownego komentarza do rysunku utrudnia interpretację. W szczególności ostatnie zdanie komentarza do tego rysunku zamieszczone na górze str.56 „*Geograficznie największa liczba odbiorców występuje w południowo-zachodniej części Polski*” wymagałoby moim zdaniem rozwinięcia. Duża liczba i średnica zaznaczonych na mapie kół wskazuje, jak mi się wydaje, na duże skupiska takich instalacji w Krakowie i na Górnym Śląsku;
- str.56, pierwsza linia tekstu pod rys.3.14: „*Grupy odbiorców oznaczenie zostały*”;
- str. 77, komentarz do rys.4.17, pomieszczone zostały, jak się wydaje, komentarze do kolejnych części rysunku 4.17;
- str. 81, komentarz do rys.4.25, 4.26 i 4.27 wskazuje na obecność linii na wykresach, w rzeczywistości zaznaczono na nich chmury punktów wygenerowane dla trzech kolejnych lat, sugeruję przygotowanie propozycji nowego komentarza do tych wykresów i przedstawienie ich w trakcie obrony;
- str.84, tabela 5.1; w ostatniej kolumnie wpisano wartość oznaczoną symbolem ER, przypuszczalnie chodzi tu o energię rzeczywistą (tu wygenerowaną w instalacjach PV), oznaczoną we wzorze (4.3) symbolem ER_{PV} niemniej prosba do Doktoranta o jednoznaczne objaśnienie. Ten sam symbol (ER) używany jest w kolejnych tabelach – 5.2 i 5.3. i odnosi się już do innych wielkości, sugeruję doprecyzowanie do jakich;
- str. 99, rys.5.21, na rysunku zaznaczono wyniki dla siedmiu spośród ośmiu modeli wskazanych w tabeli 5.4, czy było to działanie celowe? Prośba o komentarz Doktoranta;
- str. 124 pozycja 136 w wykazie literatury, wskazane zostały strony 21-23, praca opublikowana z udziałem Doktoranta figuruje w czasopiśmie na stronach 21-34.

Na stronie 16 pod rys.1.1 zamieszczone zostało zdanie: „*W 2024 roku główny wpływ na ceny energii elektrycznej miała cena wytworzenia energii z węgla kamiennego i brunatnego (około 75% udziału w miksie energetycznym)*.” Nie mam pewności jak właściwie odczytać ten zapis. Czy chodzi o to, że udział energii elektrycznej wyprodukowanej z węgla kamiennego i brunatnego stanowił we wskazanym roku 75%? Moim zdaniem był on mniejszy niż 75%. Z danych PSE za rok 2023 (Raport roczny KSE 2023) wynika, że był on na poziomie 68%, w roku 2024 przypuszczalnie jeszcze zauważalnie mniej. Będę zobowiązany za objaśnienie.

Na stronie 37, w ostatnim akapicie rozdziału 2.6 rozprawy pojawiło się zdanie: „*Obydwa wzorce wynikają ze stosowania w Polsce elektrycznych systemów ogrzewania i klimatyzacji, które zużywają dużo energii elektrycznej*.” Dużo jest tu pojęciem nieprecyzyjnym, chciałbym zwrócić uwagę, że w Polsce mamy do czynienia z najmniejszym, poza Rumunią, zużyciem energii elektrycznej na potrzeby gospodarstw domowych na mieszkańca (zgodnie z danymi

publikowanymi przez Eurostat 0,8 MWh w roku 2022 w naszym kraju, w Niemczech 1,6 MWh, w Szwecji 3,9 MWh).

Doktorant poświęcił w rozprawie niewiele miejsca problemowi prognozowania zapotrzebowania na gaz ziemny. Nie ma to co prawda istotnego wpływu na ocenę Jego osiągnięcia. Jednak deklaracja opracowania i wdrożenia metody prognostycznej odnoszącej się do gazu ziemnego jest, w świetle informacji zawartych w pracy przedstawiona nieco na wyrost. Będę zobowiązany za stanowisko Doktoranta w tej sprawie.

Na stronie 39 rozprawy znalazła się informacja: „Według różnych prognoz, moc zainstalowana w instalacjach PV w Polsce może osiągnąć 10 GW do 2025 roku i 20 GW do 2030 roku”. Trafność prognoz publikowanych w szczególności na potrzeby dokumentów rządowych od dawna budzi wątpliwości. W listopadzie 2024 moc źródeł PV w Polsce to, zgodnie ze wskazanym źródłem 20,7 GW. <https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-fotowoltaiki-w-polsce/>. Mam wrażenie, że ta część rozprawy mogła nie zostać zaktualizowana w trakcie ostatecznej jej redakcji.

Pełną listę ze wskazaniem wszystkich zauważonych usterek przekazuję Doktorantowi do dyspozycji, celem wykorzystania przy ewentualnych dalszych publikacjach.

4. Ostateczna ocena pracy

Do najważniejszych osiągnięć własnych Doktoranta w przedstawionej do recenzji pracy należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- opracowanie i wdrożenie efektywnej metody prognostycznej krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną;
- oryginalne rozwiązanie wprowadzające optymalizację doboru zmiennych objaśniających oraz zastosowanie nowych metod agregacji danych.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny rozprawy. Doktorant zrealizował przedstawiony w rozdziale 1.2 rozprawy cel pracy. Uważam, że należy podkreślić użyteczny oraz wieloaspektowy charakter przeprowadzonych prac.

Autor rozprawy, mgr inż. Paweł Machał, wykazał się wiedzą praktyczną i teoretyczną w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to w jasny sposób z treści ocenianego dokumentu.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autor, mgr inż. Paweł Machał wykazał umiejętność formułowania zadania naukowego, opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, znajomość stanu osiągnięć w obszarach wiedzy związanych z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąc przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Machała pt.: **„Prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną i gaz w firmie TAURON Sprzedaż sp. z o.o. w horyzoncie krótkoterminowym”** stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki a także w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.