

## **Recenzja**

### **pracy doktorskiej mgr inż. Rafała Czapaja**

#### **pt. "Prognozowanie krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną metodą ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej"**

Podstawa opracowania recenzji: podstawę formalną stanowi uchwała Rady Naukowej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN z dnia 16.12.2021 r. oraz pismo Dyrektora Instytutu Prof. dr hab. inż. Krzysztofa Galosa, z dnia 22.12.2021 r. zlecające wykonanie przedmiotowej recenzji.

### **1. Tematyka pracy**

Obszarem badań podjętych przez Doktoranta w recenzowanej rozprawie są zagadnienia związane z prognozowaniem zapotrzebowania na moc elektryczną w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE). Doktorant w swej pracy skupił się na prognozowaniu krótkoterminowym, zwłaszcza w horyzoncie dobowym.

Bezpieczeństwo energetyczne, w tym zapewnienie ciągłości dostaw energii elektrycznej, w obecnych warunkach funkcjonowania społeczeństwa i gospodarki jest jedną z podstawowych potrzeb. Biorąc pod uwagę obserwowane kierunki rozwoju przemysłu (Przemysł 4.0), dostępność nowych technologii, zmiany nawyków u odbiorców indywidualnych czy przemysłowych (po stronie popytu) oraz możliwości zapewnienia energii pochodzącej z konwencjonalnych czy odnawialnych źródeł (po stronie podaży), można stwierdzić, że proces odpowiedniego zbilansowania zapotrzebowania na energię nie jest prosty w realizacji i wymaga korzystania z wiarygodnych prognoz oraz zastosowania zaawansowanych metod analitycznych wspomagających podejmowanie decyzji w tym zakresie.

Prognozowanie zapotrzebowania na moc elektryczną w kontekście zmian klimatycznych, technologicznych oraz społecznych jest nie lada wyzwaniem, podejmowanym

przez różne ośrodki analityczne i badawcze. Nierównomierność zapotrzebowania na moc, która wynika głównie z sezonowości (w ujęciu rocznym), cykliczności (w ujęciu tygodniowym), ale również ze zmian zachowań konsumentów energii (w czasie doby) utrudnia zadanie budowy jednego, uniwersalnego modelu w tym zakresie.

Doktorant w swej rozprawie podjął się opracowania metody dla potrzeb tworzenia prognoz krótkoterminowych, które mogą wspomóc opracowanie planów koordynacyjnych dobowych (BPKD), stanowiących najważniejszy element planowania rynku bilansującego. Swe starania skupił na zwiększeniu dokładności dobowych prognoz zapotrzebowania na moc elektryczną, ze szczególnym uwzględnieniem godzin nocnych. To właśnie w tych godzinach często dochodzi do niedoszacowania prognoz, a w efekcie do ponoszenia większych kosztów, wywołanych koniecznością korzystania z droższych ofert zakupu energii.

Stąd, na podstawie powyższych rozważań, stwierdzam, że podjęty temat rozprawy jest interesujący i ważny, nie tylko z badawczego, ale przede wszystkim z praktycznego punktu widzenia.

## **2. Syntetyczna charakterystyka pracy**

Tekst rozprawy obejmuje 189 stron wraz ze spisem bibliografii oraz 1 załącznik (liczący 255 stron wraz ze spisami). Bibliografia obejmuje 378 źródeł literaturowych.

Recenzowana praca ma charakter teoretyczno-praktyczny, w której można wyróżnić dwie wyodrębniające się części:

1. część pierwsza dotyczy zagadnień teoretycznych i zawiera się we wprowadzeniu oraz rozdziałach 1÷3.2 (strony 12 - 87),
2. część druga posiada charakter praktyczny i zawarta jest w rozdziałach 3.3÷4.5 (strony 88 - 155) wraz z podsumowaniem i wnioskami końcowymi (strony 156 - 162).

We wstępie Doktorant syntetycznie uzasadnia podjęcie tematu pracy, przedstawia cel główny pracy, cele cząstkowe oraz hipotezy badawcze.

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawił postawy teoretyczne prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną, wychodząc od ujęcia prognozowania w kontekście ekonometrii i statystyki. Następnie przedstawił specyficzne uwarunkowania funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego wraz z przeglądem metod i analiz wykorzystywanych do prognozowania w elektroenergetyce.

W rozdziale drugim został zaprezentowany przegląd badań w obszarze prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną w systemie elektroenergetycznym, który objął m.in.

analizę 47 publikacji, w których zostały przedstawione metody prognostyczne oraz opracowane modele. Modele prognostyczne, których wyróżniono 264, zostały przedstawione w Tabeli 2.1. wraz z autorską rekomendacją dotyczącą potencjału analizowanych metod w kontekście potrzeb Polskich Sieci Elektrycznych S.A. (PSE S.A.).

Rozdział trzeci obejmuje prezentację założeń opracowanej przez Doktoranta metody wykorzystującej współczynniki funkcji autokorelacji cząstkowej do prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną. W pierwszej części rozdziału zaprezentowano zarys teorii modeli autoregresyjnych oraz metod wyznaczania współczynników autokorelacji i autokorelacji cząstkowej. Następnie Doktorant przedstawił autorską koncepcję wyznaczania krótkoterminowych prognoz w oparciu o współczynniki funkcji autokorelacji cząstkowej w dwóch wersjach, w tzw. podejściu klasycznym i krokowym. W dalszej części zawarł pozostałe założenia modelu matematycznego i przyjętą procedurę (obejmującą m.in. kalibrację modelu).

W rozdziale czwartym została szczegółowo przedstawiona walidacja opracowanej metody. Doktorant w tym celu wykorzystał różnego rodzaju dane. Pierwszy zbiór obejmował dane historyczne dotyczące zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE w latach 2009-2018. Doktorant do walidacji wykorzystał również zbiory danych z wybranych zagranicznych systemów elektroenergetycznych tj. szwedzkiego i francuskiego. W tej części porównał również otrzymane wyniki z innymi wybranymi metodami autoregresyjnymi. Dla potrzeb walidacji określił kryteria dopuszczalności prognoz w podziale na: niedopuszczalne (wartość błędu MAPE > 6%), dopuszczalne ( $4\% < \text{MAPE} \leq 6\%$ ), dokładne ( $2\% < \text{MAPE} \leq 4\%$ ) i bardzo dokładne ( $\text{MAPE} \leq 2\%$ ).

Całość pracy podsumowano wnioskami oraz wskazano możliwość wykorzystania opracowanej metody w praktyce poprzez stworzenie prototypu prognostycznego, który może wspomóc działanie PSE S.A w przygotowywaniu planów BPKD.

### **3. Cele i hipotezy badawcze postawione w rozprawie**

Sformułowane w rozprawie cele pracy i hipotezy badawcze wynikają z dokonanej analizy stanu zagadnienia i określonych potrzeb PSE S.A. m.in. w zakresie minimalizacji błędów krótkoterminowych prognoz zapotrzebowania na moc elektryczną.

Celem głównym pracy było: *„opracowanie autoregresyjnej metody do prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną, cechującą się co najmniej dopuszczalną jakością prognoz (tj. wartościami błędu  $4,00\% < \text{MAPE} \leq 6,00\%$ ), ze szczególnym uwzględnieniem*

*pierwszych sześciu godzin doby oraz dla dni świątecznych i niestandardowych*". Według mnie jest to cel posiadający właściwe cechy – jest specyficzny, mierzalny i istotny z punktu widzenia praktycznego. Na docenienie zasługuje przyjęcie dość wysokich kryteriów jakości dla otrzymywanych prognoz.

Doktorant przedstawił również cztery cele cząstkowe (str.15), które w mojej ocenie dość jasno i szczegółowo określiły kroki, które Doktorant podjął w celu osiągnięcia głównego celu pracy.

W rozprawie sformułowano trzy hipotezy badawcze:

1. *„Możliwe jest opracowanie nowej elastycznej metody prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, cechującej się współmiernością i racjonalnością nakładów, względem oczekiwanego poziomu jakości prognoz.*
2. *Celowe i możliwe jest opracowanie modelu prognostycznego bazującego na ważonych współczynnikach funkcji autokorelacji cząstkowej, dedykowanego pierwszym sześciu godzinom doby oraz wybranym dniom świątecznym i niestandardowym, dla dużych systemów elektroenergetycznych.*
3. *Możliwe jest uzyskanie dopuszczalności i skuteczności prognoz na poziomie konkurencyjnym względem metod obecnie stosowanych przez operatorów systemów przesyłowych dla pierwszych sześciu godzin doby oraz dla dni świątecznych i niestandardowych*".

W kontekście bardzo szczegółowo przedstawionej analizy stanu zagadnienia, należy wskazać, iż hipotezy badawcze sformułowano poprawnie, jakkolwiek w przypadku hipotezy pierwszej, współmierność i racjonalność nakładów dla określonej metody prognostycznej może być trudna do wykazania.

Podsumowując tą część recenzji stwierdzam, że postawione cele pracy jak i hipotezy badawcze (oprócz podniesionej powyżej kwestii) nie budzą moich zastrzeżeń.

#### **4. Syntetyczna ocena pracy**

Podjęty przez Doktoranta temat posiada zarówno walor poznawczy, jak i praktyczny. Problematyka poruszona w pracy ma istotne znaczenie zarówno dla społeczeństwa jak i gospodarki, dotykając jednej z podstawowych potrzeb w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego.

Na uwagę zasługuje wnikliwa analiza stanu literatury, która została przeprowadzona w sposób kompleksowy, wychodząc od kwestii bardzo ogólnych z zakresu statystyki

i ekonometrii, poprzez wprowadzenie do zagadnień związanych z Krajowym Systemem Elektroenergetycznym oraz zasadami jego funkcjonowania i prezentację stanu badań dotyczących prognozowania w zakresie zapotrzebowania na moc elektryczną, a skończywszy na dość szczegółowych podstawach teoretycznych modeli autoregresyjnych.

W ocenie realizacji podjętego tematu pracy chciałam szczególnie podkreślić wkład i zaangażowanie Doktoranta w:

1. szczegółową analizę stanu obecnego badań w zakresie prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną w systemach elektroenergetycznych, która objęła 246 modeli prognostycznych wraz z podaniem wartości miernika oceny jakości prognoz MAPE, co stanowi bardzo cenny materiał porównawczy;
2. przeprowadzenie bardzo szczegółowej wielowymiarowej analizy statystycznej zbiorów danych wraz z wizualizacją szeregów czasowych i ich analizą, w różnych ujęciach (godzin, dnia tygodnia, miesięcy, kwartałów);
3. zaproponowanie oryginalnej metody dla potrzeb krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną opartej na współczynnikach autokorelacji cząstkowej;
4. rzetelną walidację opracowanej metody, przeprowadzoną na różnych zbiorach danych oraz porównanie osiągniętych wyników z innymi metodami, co zasługuje na szczególne wyróżnienie.

Recenzowana rozprawa doktorska cechuje się dużą wnikliwością dociekań. Doktorant zaprezentował obfity materiał świadczący o rzetelnym i kompleksowym podejściu do realizacji własnych badań. Doktorant, w mojej ocenie, potwierdził właściwy zasób wiedzy w zakresie zagadnień związanych z prognozowaniem krótkoterminowym. Wykazał się również umiejętnością stosowania różnych metod naukowych oraz specjalistycznego oprogramowania.

Na tej podstawie stwierdzam, iż Autor wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a opracowana metoda jest oryginalnym sposobem rozwiązania sformułowanego problemu naukowego.

Podsumowując ten punkt recenzji, stwierdzam, iż poziom merytoryczny pracy oceniam bardzo pozytywnie.

## **5. Uwagi dyskusyjne i krytyczne**

Jakkolwiek wysoko oceniam samą rozprawę, tak po zapoznaniu się z jej treścią, nasunęły mi się pewne uwagi i wątpliwości, z których pozwolę sobie wybrać, w moim

odczuciu, najważniejsze:

1. Doktorant stwierdza, iż celem pracy jest „*opracowanie autoregresyjnej metody do prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną (...)*”. Stąd, na wstępie spodziewałabym się wnikliwego wprowadzenia do teorii analizy szeregów czasowych, wraz ze szczegółowym wprowadzeniem do modeli autoregresyjnych, które są wykorzystywane w części dotyczącej walidacji opracowanej metody. Niestety, w tym miejscu, Doktorant wprowadza dość szerokie wprowadzenie do teorii prognozowania i ekonometrii oraz statystyki, co według mnie ma mniejszy (lub żaden) związek z treścią rozprawy (por. Rys.1.1.1). Pewne treści z tego zakresu są prezentowane w podrozdziale 3.1, ale w mojej ocenie nie są one wyczerpujące w stosunku do oczekiwań związanych z rozprawą dotyczącą analizy szeregów czasowych.
2. Wstępna, eksploracyjna analiza danych ma kluczowe znaczenie dla budowy dalszych modeli, stąd uważam, że zawartość tej części pracy wraz ze szczegółowym omówieniem powinna znaleźć się w zasadniczej części rozprawy, a nie w Załączniku (np. Tab. 3.1., 3.2., 3.6, 3.7 czy wybrane rysunki z Rys.3.1 – 3.8).
3. Na stronie 77 Doktorant stwierdza, że: „*Analiza szeregów czasowych w znacznej mierze bazuje na stacjonarności danych jednak w większości przypadków założenie, że badany szereg jest niestacjonarny jest zbyt proste*”. W pracy brakuje, w mojej ocenie, szczegółowej analizy szeregów czasowych w tym zakresie, jak również bardziej zaawansowanej oceny opracowanej metody, w postaci analizy reszt. Oparcie wnioskowania tylko o wskaźnik MAPE, bez sprawdzenia założeń dot. stacjonarności, jest według mnie niewystarczające.
4. Biorąc pod uwagę charakter współczynników autokorelacji, wątpliwości moje budzi zasadność sumowania ich w mianowniku wzorów 4.53 i 4.54. Czy Doktorant mógłby dokładniej wyjaśnić ten element metody?
5. W mojej ocenie analiza dopuszczalności prognoz prezentowana m.in. w tabelach 4.1.3.1 – 4.1.5.4 jest zbędna w świetle zawartości rozdziału 4.2.1 i tabel 4.2.2.1 – 4.2.2.9. Jest to niepotrzebne powielanie informacji, szczególnie jeśli dość wyraźnie określono kryteria dopuszczalności prognoz (Tab. 4.1.1.1).
6. W bardzo bogatej bibliografii występują niestety niepotrzebne powtórzenia pozycji literaturowych (np. 114 i 115, 178 i 179, 206 i 207 czy 229 i 230). Wątpliwe dla mnie jest również zamieszczanie pozycji o tych samych lub podobnych tytułach, pochodzących z konferencji i czasopism (np. 51 i 56, 85 i 86, 94 i 95). Uważam, że warto byłoby wybrać jedno źródło o większej wartości merytorycznej. Źródła

internetowe nie zostały jasno wyróżnione w spisie, ja naliczyłam ich 7 (pozycje 21, 71, 151, 256 oraz 376-378), niestety wszystkie bez podania dat dostępu.

Ponadto:

Niedostatecznie moim zdaniem zostały opisane skróty użyte w Tabeli 2.1. np. ea, UV itp. W pracy występują powtórzenia treści, np. na str. 64 treść akapitu dotyczącego skrótów modeli Top 10, jest w pewnym sensie powtórzona w akapicie trzecim na tej samej stronie. Pojawiają się również pojedyncze błędy w opisie rysunków, np. Rys 1.3.2.19, który dotyczy pierwszego pełnego tygodnia miesiąca stycznia, a nie lipca, jak głosi podpis.

Jednocześnie pragnę podkreślić, że praca została przygotowana bardzo starannie, a zgłoszone w tym miejscu uwagi nie obniżają mojej pozytywnej oceny przedłożonej pracy.

## **Wniosek końcowy**

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Czapaja pt. *“Prognozowanie krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną metodą ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej”* stanowi oryginalny dorobek naukowy doktoranta.

Przedłożona praca potwierdza wysoki poziom wiedzy naukowej Doktoranta i umiejętności samodzielnych badań związanych z dyscypliną inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mgr inż. Rafała Czapaja **spełnia warunki** stawiane pracom doktorskim w *art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz. 1668 z późn. zmianami)* i wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Edyta Bryclay*

