

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgr inż. Rafała Czapaja

pt. „**Prognozowanie krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną metodą ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej**”

### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała nr 10/IV/2021 Rady Naukowej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie z dnia 16 grudnia 2021 r. oraz pismo Dyrektora Instytutu, Pana Prof. dr hab. inż. Krzysztofa Galosa, z dnia 22 grudnia 2021 r. (nr pisma AO-520-17/21).

### **2. Tematyka, cel i teza rozprawy**

Rozprawa dotyczy krótkoterminowego prognozowania globalnego zapotrzebowania na moc czynną w systemie elektroenergetycznym. Jest to tematyka stale aktualna, ponieważ posiadanie przez Operatora Systemu Przesyłowego (OSP) właściwej prognozy zapotrzebowania na kolejną dobę jest kluczowym czynnikiem pozwalającym na przygotowanie planu pracy jednostek wytwórczych centralnie dysponowanych, który zapewni zbilansowanie systemu oraz jego bezpieczną pracę w różnych sytuacjach ruchowych (wymagana rezerwa mocy określana jest proporcjonalnie do prognozowanego zapotrzebowania). Wyższa dokładność prognozy wpływa również na ekonomikę funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, pozwalając na minimalizację kosztownych uruchomień bloków cieplnych oraz zmniejszenie ilości tzw. energii bilansującej, kupowanej na rynku bilansującym po cenie, której wartość zależy m.in. od dokładności prognozy.

Wydawać by się mogło, że po wielu dziesięcioleciach prac nad modelami prognostycznymi, problem właściwego prognozowania zapotrzebowania na moc czynną w systemie elektroenergetycznym jest już w pełni rozwiązany. Tezę tę poniekąd potwierdza Autor rozprawy, prezentując w tabeli 3.7.1, mierzoną za pomocą błędu *MAPE* (*Mean Absolut Percentage Error*), roczną skuteczność prognoz dobowych osiąganą w latach 2009 ÷ 2018 przez polskiego Operatora Systemu Przesyłowego. Dla analizowanego okresu średnia wartość

błędu *MAPE* wynosi 0,82%, co zgodnie z kryteriami dopuszczalności prognoz zawartymi w tabeli 4.1.1.1, klasyfikuje prognozy polskiego OSP do grupy prognoz bardzo dokładnych. Jest to jednak klasyfikacja ogólna, bazująca na średniej wartości błędu *MAPE* dla okresu rocznego. Aby bardziej szczegółowo ocenić dokładność stosowanego modelu prognostycznego należy przeanalizować błędy prognozy dla poszczególnych godzin horyzontu prognozy. Taką ocenę Autor prezentuje w tabelach 4.2.1.2 i 4.2.1.3, w których zestawiał wartości błędów *MAPE* dla prognoz przygotowanych przez polskiego OSP w latach 2009 ÷ 2018, ale z podziałem na godziny od 00:00 do 05:00 (tabela 4.2.1.2) i od 06:00 do 23:00 (tabela 4.2.1.3). Zamieszczone wyniki wskazują na gorsze efekty uzyskiwane przez OSP dla godzin od 00:00 do 05:00 w stosunku do godzin od 06:00 do 23:00 (średnie wartości błędów *MAPE* wynoszą odpowiednio 1,02% i 0,75%). Jeszcze bardziej szczegółowa analiza (tabele 4.2.1.6 ÷ 4.2.1.9) pokazuje, że największych błędów prognoz można oczekiwać dla dni świątecznych, jednak cały czas prognozy uzyskiwane przez OSP należą do grupy prognoz bardzo dokładnych.

Uzyskanie przez polskiego OSP tak wysokiej dokładności prognoz dla różnych warunków pracy systemu elektroenergetycznego jest możliwe m.in. dzięki wykorzystaniu modeli prognostycznych bazujących na prognozach kluczowych czynników wpływających na poziom zapotrzebowania na moc w krajowym systemie elektroenergetycznym. Uzależnienie stosowanych modeli prognostycznych od danych zewnętrznych rodzi jednak ryzyko zaburzenia procesu prognozowania w przypadku braku dostępu do tych danych, np. na skutek przerwania ciągłości komunikacji elektronicznej lub w wyniku awarii po stronie dostawcy danych. Na wypadek zaistnienia takich sytuacji operator powinien mieć do dyspozycji rezerwowy model prognostyczny, bazujący jedynie na własnych informacjach. Opracowanie takiego modelu jest celem rozprawy.

Realizując nakreślony cel, Autor zwraca się ku metodom autoregresyjnym, które w procesie prognozowania zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym wykorzystują jedynie dane dotyczące poziomu tego zapotrzebowania w okresach przeszłych, a więc informacje, do których Operator Systemu Przesyłowego posiada łatwy i niezakłócony dostęp. W stosunku do opracowywanego modelu Autor stawia wymagania, aby prognozy otrzymane z jego zastosowaniem spełniały co najmniej kryterium dopuszczalności, czyli cechowały się błędem *MAPE* o wartości nie większej niż 6%. Szczególny nacisk Autor kładzie na uzyskanie dopuszczalności prognoz dla godzin od 00:00 do 05:00 oraz dni świątecznych i niestandardowych, czyli dla tych okresów, w których dokładność prognoz uzyskiwana obecnie przez OSP jest najmniejsza. Tak postawione wymagania należy uznać za ambitne.

W nawiązaniu do tematyki pracy oraz postawionego celu, Autor sformułował trzy hipotezy badawcze, składające się na tezę pracy. Wszystkie te hipotezy są sformułowane w sposób standardowy i mówią kolejno, że: (i) możliwe jest opracowanie nowej metody prognozowania zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym, przy racjonalnym

poziomie ponoszonych nakładów, względem uzyskiwanych wyników, (ii) celowe jest wykorzystanie do tego metody ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej, (iii) opracowana metoda pozwoli na uzyskanie jakości prognoz spełniających kryterium dopuszczalności, w szczególności dla godzin od 00:00 do 05:00 oraz dla dni świątecznych i niestandardowych. Tak postawione hipotezy badawcze są zbieżne z celem pracy i informują czytelnika, co Autor zamierza zrobić, jaką zastosuje do tego metodę oraz jak oceni uzyskane wyniki. Zatem w wyniku realizacji sformułowanego w pracy celu spełnione zostaną postawione hipotezy.

Reasumując, uważam wybraną tematykę rozprawy za interesującą i aktualną, zarówno od strony naukowej, jak i utylitarnej. Cel pracy został jasno sformułowany. Teza została postawiona w sposób poprawny i odpowiadający celowi pracy.

### **3. Ogólna charakterystyka i ocena rozprawy**

Opiniowana rozprawa jest bardzo obszerna. Zawiera około 150 stron treści zasadniczej, obejmującej wprowadzenie, cztery rozdziały główne i podsumowanie. Dodatkowo praca zawiera spis oznaczeń i symboli, spis rysunków i tabel oraz spis literatury, składający się z 378 pozycji. Rozprawę uzupełnia jeszcze obszerniejszy załącznik (blisko 230 stron), prezentujący szczegółowe wyniki obliczeń.

We wprowadzeniu Autor ogólnie omawia problematykę krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym, zwracając uwagę na zachodzące obecnie zmiany, wpływające na kształtowanie się dobowej krzywej obciążenia. Autor wskazuje wiele czynników zmieniających znany od dekad kształt systemowej krzywej zapotrzebowania na moc, przy czym za najważniejsze z nich można uznać: (i) zmiany zachowań odbiorców indywidualnych, skutkujące znaczącym wzrostem zużycia energii elektrycznej w różnych okresach doby i roku (np. klimatyzacja i pompy ciepła), (ii) wzrost udziału źródeł odnawialnych, w tym instalacji prosumenckich, (iii) uelastycznienie zużycia energii przez odbiorców przemysłowych (przenoszenie obciążeń w czasie). W takich warunkach proces prognozowania staje się trudniejszy, a zatem zapewnienie odpowiedniej jakości prognoz wymaga zastosowania zaawansowanych modeli prognostycznych, wykorzystujących szereg danych zewnętrznych. To z kolei, jak wspomniano w poprzednim punkcie recenzji, wprowadza ryzyko zaburzenia tego procesu. W odpowiedzi na zidentyfikowane ryzyko Autor postuluje opracowanie modelu prognostycznego na nie niewrażliwego. Uważam, że przedstawiona przez Autora argumentacja uzasadnia celowość podjęcia opisanych w rozprawie prac. Na tle tych rozważań Autor formułuje cel i hipotezy badawcze, które zostały omówione w poprzednim punkcie.

Rozdział pierwszy pracy jest rozdziałem ogólnym. Rozpoczyna się od wyjaśnienia czym jest proces prognozowania i jakie metody mogą być zastosowane do jego zrealizowania. Następnie wskazano jakie elementy z dziedziny ekonometrii i statystyki Autor wykorzystał w swoich pracach. Po tym wstępie teoretycznym następuje opis przedmiotu badań, jakim jest

dobowe zapotrzebowanie na moc w systemie elektroenergetycznym, na przykładzie obciążenia Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Opis zmienności zapotrzebowania KSE został wykonany na dużym zbiorze danych, obejmującym lata 2009 ÷ 2018. Opis ten obejmował m.in. dobową zmienność obciążenia średniego oraz zmienność maksymalnego i minimalnego zapotrzebowania na moc w analizowanych latach, a także przebiegi czasowe zapotrzebowania dla różnych lat w różnych okresach roku. Przedstawiona analiza pozwala wskazać pewne charakterystyczne cechy przebiegu obciążenia KSE, np. zmienność dobową, tygodniową i sezonową, które to cechy jak najdokładniej powinny zostać odwzorowane przez model prognostyczny. W dalszej części rozdziału, na tle procesu planowania pracy systemu elektroenergetycznego realizowanego przez OSP w ramach rynku bilansującego, Autor uzasadnia konieczność stałego polepszania jakości prognoz zapotrzebowania. Następnie definiuje stosowane w elektroenergetyce horyzonty prognostyczne, skupiając się na horyzoncie krótkoterminowym, stanowiącym główny obszar zainteresowania w rozprawie. Na zakończenie rozdziału opisuje ogólnie metody stosowane do prognozowania zapotrzebowania na moc (uważam, że ta część rozdziału pierwszego powinna znaleźć się w rozdziale drugim).

W rozdziale drugim Autor dokonuje przeglądu literatury dotyczącej metod prognozowania zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym, przy czym analizie poddaje tylko te modele prognostyczne, których autorzy do oceny jakości uzyskanej prognozy stosują błąd *MAPE*, informujący o średniej wartości błędów prognoz wyrażonych w procentach rzeczywistych wartości zmiennej prognozowanej. Jest to słuszne podejście, pozwalające porównywać dokładność prognoz otrzymywanych za pomocą różnych modeli. Wykonana analiza obejmuje blisko 50 pozycji literaturowych opracowanych w latach 1997 ÷ 2018. Rozpatrywane pozycje powstały w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie i zostały opublikowane w różnych wydawnictwach. Opisanych zostało w nich około 200 modeli prognostycznych. Wszystkie analizowane przez Autora modele w przejrzysty sposób zostały scharakteryzowane w tabeli 2.1. Każdy z analizowanych modeli został również poddany przez Autora ocenie „w kontekście potrzeb PSE S.A.”. Niestety Autor nie przedstawił kryteriów jakie przyjął wydając swoją rekomendację.

Rozdział 3 jest rozdziałem zasadniczym i zawiera opracowany przez Autora model matematyczny służący do krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym. Przystępując do budowy modelu Autor w pierwszej kolejności zbadał powtarzalność zapotrzebowania na moc, na podstawie historycznego zapotrzebowania w KSE. Wyniki analiz zostały przedstawione na odpowiednich korelogramach (rysunki 3.1.1 i 3.1.2 i odpowiednie rysunki z załącznika). Zaprezentowane wyniki wskazują m.in., że zapotrzebowanie w danej godzinie doby jest silnie skorelowane z zapotrzebowaniem jakie wystąpiło w tej samej godzinie doby tydzień wcześniej, dwa tygodnie wcześniej, itd., przy czym wraz z upływem czasu korelacja ta słabnie, natomiast korelacja zapotrzebowania w danej godzinie doby z zapotrzebowaniem jakie wystąpiło w tej

samej godzinie doby w pozostałych dniach tygodnia jest znacznie mniejsza. Tę zależność Autor postanowił wykorzystać do budowy modelu prognostycznego. Matematyczną postać modelu prezentują zależności (4.53) – podejście klasyczne – i (4.54) – podejście krokowe. Co do postaci wzoru, oba modele są analogiczne, a różnią się tylko tym, że w podejściu klasycznym „okno czasowe”, dla którego wyznaczane są współczynniki modelu jest stałe, a w podejściu krokowym przesuwa się w czasie. Wzory (4.53) i (4.54) są klasycznymi wzorami służącymi do obliczania średniej ważonej, więc w zaproponowanym modelu prognozowane zapotrzebowanie na moc w danej godzinie rozpatrywanej doby prognostycznej jest po prostu średnią ważoną z wartości zapotrzebowania jakie wystąpiło w tych samych godzinach w przeszłości. Głównym problemem w takim podejściu jest określenie długości okresu historycznego będącego podstawą do wyznaczenia wag modelu oraz odpowiednie wyznaczenie wartości tych wag. Do określenia wag modelu Autor zaproponował wykorzystanie funkcji autokorelacji cząstkowej, będącej narzędziem mierzącym sezonowość badanej zmiennej – w tym przypadku zapotrzebowania na moc w kolejnych godzinach doby. Wagi modelu – współczynniki funkcji autokorelacji cząstkowej – zostały wyznaczone za pomocą równań Yule – Walker’a, z zastosowaniem pakietu Statistica. Celem określenia okresu przeszłego, na bazie którego wyznaczane są wagi modelu, w podejściu klasycznym przetestowano ponad 100 różnych długości okresów obejmujących doby poprzedzające, z opóźnieniem od 2 do 365 dób. Najwyższą skuteczność prognozy uzyskano dla okresu obejmującego 344 doby poprzedzające i dla opóźnienia wynoszącego 15 dób. Dla podejścia krokowego przeprowadzono podobne badania, przy czym jakość uzyskanych prognoz w tym przypadku była gorsza (otrzymano większą wartość błędu *MAPE* w stosunku do podejścia klasycznego). Z tego względu, a także ze względu na większą czasochłonność podejścia krokowego, do dalszych analiz szczegółowych wybrano podejście klasyczne. Należy stwierdzić, że opisany w tym rozdziale model jest zgodny ze sformułowanym celem pracy, tzn. bazuje jedynie na własnych informacjach OSP, w tym przypadku na historycznym zapotrzebowaniu na moc. W kolejnym rozdziale przeprowadzono szczegółową walidację opracowanego modelu prognostycznego.

Walidacja zaproponowanego modelu prognostycznego została przeprowadzona na trzy sposoby:

1. na podstawie danych o wielkości zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE w latach 2009 ÷ 2018,
2. na podstawie danych o wielkości zapotrzebowania na moc elektryczną w systemach elektroenergetycznych Szwecji i Francji w latach 2013 ÷ 2018,
3. na podstawie wyników uzyskanych przez 80 prognostycznych modeli autoregresyjnych, zasilanych danymi o wielkości zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE.

W każdym przypadku podstawą oceny była wartość błędu *MAPE*, pozwalająca na przyporządkowanie uzyskanej prognozy do jednej z czterech grup: prognoza bardzo dokładna ( $MAPE \leq 2\%$ ), prognoza dokładna ( $2\% < MAPE \leq 4\%$ ), prognoza dopuszczalna ( $4\% < MAPE$

$\leq 6\%$ ), prognoza niedopuszczalna ( $6\% > MAPE$ ), przy czym należy podkreślić, że w ocenie swojego modelu Autor przyjął ostrzejsze kryteria od zwykle stosowanych.

Ogólna analiza jakości prognoz wskazuje, że opracowany model autoregresyjny pozwolił na uzyskanie dopuszczalnych prognoz dla KSE dla godzin nocnych (od 00:00 do 05:00), przy czym średnia wartość błędu *MAPE* w okresie 2009 ÷ 2018 dla tych godzin wynosi 5,78%. Dodatkowo dla tych godzin, dla śród, czwartków i piątków uzyskano prognozy spełniające kryterium prognoz dokładnych (wartości średnie błędów *MAPE* wyniosły odpowiednio 3,10%, 2,94% i 3,10%). Gorsze wyniki (średnia wartość błędu *MAPE* na poziomie 9,10%) uzyskano dla pozostałych godzin doby, obejmujących godziny od 00:06 do 23:00, przy czym należy podkreślić, że gdyby zastosować niezastrzone przez Autora kryteria oceny, to prognozy te zostałyby sklasyfikowane jako dopuszczalne. Dodatkowo trzeba zaznaczyć, że dla okresu od 00:06 do 23:00, dla wtorków, śród, czwartków i piątków uzyskano prognozy dopuszczalne (wg zawężonego kryterium oceny), a w wielu godzinach również prognozy dokładne. Na tym tle gorzej wypadają prognozy dla dni świątecznych i niestandardowych, dla których kryterium dopuszczalności jest spełnione tylko w ograniczonej liczbie przypadków.

W kolejnym etapie przeprowadzona została ocena jakości prognoz uzyskiwanych przez zaproponowany przez Autora model z wynikami prognoz uzyskiwanymi przez operatorów szwedzkiego i francuskiego. Zdecydowano się na przetestowanie metody dla danych pochodzących z systemów zagranicznych dlatego, że ich dobowe przebiegi obciążeń mogą charakteryzować się innymi cechami, niż przebiegi dla KSE (np. inny kształt krzywej zapotrzebowania, odmienna szybkość narastania i redukcji zapotrzebowania, inne godziny występowania doliny i szczytu obciążenia). Przeprowadzone porównanie pokazało, że zaproponowany model nie pozwolił oczywiście na osiągnięcie takich samych dokładności prognoz jak zaawansowane modele prognostyczne stosowane przez zagranicznych operatorów, jednak otrzymana regresja prognoz jest na akceptowalnym poziomie i jest w zasadzie jednakowa dla obu systemów. Dodatkowo w obu przypadkach mniejsze pogorszenie jakości prognozy uzyskano dla godzin nocnych.

Ostatni etap walidacji opracowanego w rozprawie modelu miał na celu porównanie wyników uzyskiwanych z jego zastosowaniem z wynikami innych modeli prognostycznych zaliczanych do kategorii metod autoregresyjnych. Spośród 80 rozpatrywanych modeli (tabela 4.4.1.1), do szczegółowych analiz porównawczych zakwalifikowano model *ARIMA* (*Autoregressive Integrated Moving Average*), metodę naiwną z opóźnieniem siedmiu dób oraz metodę naiwną z opóźnieniem jednej doby. Podobnie jak w przypadku porównania z wynikami prognoz uzyskiwanych dla systemów zagranicznych, również w przypadku wyników prognoz uzyskiwanych dla innych modeli autoregresyjnych w ogólnej ocenie zaobserwowano spadek jakości prognozy, przy czym również w tym przypadku spadek ten był na akceptowalnym poziomie, a ponadto był wyraźnie mniejszy dla godzin nocnych. Dodatkowo wykazano, że zaproponowany model dał lepsze wyniki prognozy dla wielu

godzin, a niekiedy całych dni świątecznych, niż modele znane z literatury. Najważniejsze wyniki uzyskane w rozprawie omówiono w podsumowaniu, gdzie przedstawiono również wnioski końcowe oraz sformułowano możliwe kierunki dalszych badań.

Dokonując oceny całości pracy należy stwierdzić, że osiągnięto postawiony w pracy cel oraz udowodniono sformułowane hipotezy badawcze. Praca została właściwie skomponowana i zawiera wszystkie elementy składające się na rozprawę doktorską. Podsumowując, moja ogólna ocena rozprawy jest jednoznacznie pozytywna.

#### **4. Pytania i uwagi dyskusyjne, komentarze**

##### Pytania i uwagi dyskusyjne

1. W rozdziale 1.3.1 pt. „Zapotrzebowanie na moc elektryczną a obciążenie systemu elektrycznego” Autor pisze: „Wspomniane podmioty... na bieżąco oceniają obciążenie... systemów elektroenergetycznych mocą czynną i porównują z chwilowym zapotrzebowaniem na moc elektryczną. Wynikiem takiego porównania jest informacja, że obciążenie systemu jest za małe lub za duże w odniesieniu do chwilowego zapotrzebowania na moc elektryczną. Dzięki zastosowaniu prognozowania do planowania pracy systemów elektroenergetycznych możliwe jest zminimalizowanie odchyleń pomiędzy obciążeniem systemu elektroenergetycznego mocą czynną elektryczną i zapotrzebowaniem na tę moc.”. W moim rozumieniu określenia „obciążenie mocą czynną” i „zapotrzebowanie na moc czynną” są synonimami. Proszę o wyjaśnienie tego fragmentu pracy.
2. W rozdziale 1.3.2 Autor przedstawia dobową zmienność zapotrzebowania w KSE na tle zmienności różnych parametrów pogodowych (ilustrują to rysunki 1.3.2.1 i 1.3.2.2). Zmienność zapotrzebowania została przedstawiona na tle temperatury powietrza, wysokości podstawy chmur, widzialności, prędkości wiatru temperatury punktu rosy i ciśnienia pary wodnej. Uważam, że spośród wymienionych czynników pogodowych wpływ na zapotrzebowanie na moc czynną w systemie ma jedynie temperatura powietrza. Jaki zatem był cel uwzględnienia pozostałych czynników pogodowych?
3. W tabeli 2.1 Autor zestawia modele prognostyczne opisane w analizowanych źródłach literaturowych wraz z ich krótką charakterystyką. Zamieszcza również autorską rekomendację dotyczącą przydatności analizowanych metod w „w kontekście potrzeb PSE S.A.”. Jakie kryterium Autor przyjął oceniając przydatność danego modelu prognostycznego w działalności polskiego OSP?
4. Opracowany przez Autora model prognostyczny (zależność (4.53)) ma za zadanie wyznaczyć prognozowaną wartość zapotrzebowania w poszczególnych godzinach rozpatrywanej doby w taki sposób, aby obliczona na podstawie rzeczywistego zapotrzebowania w tej dobie wartość błędu *MAPE* była minimalna. Danymi wejściowymi do modelu są znane (historyczne) wartości godzinowego zapotrzebowania na moc, jakie wystąpiły w analogicznych godzinach w okresie przeszłym. Wagami

modelu są, określane w odpowiedni sposób, współczynniki autokorelacji. Wydaje się, że tak sformułowane zadanie prognostyczne można potraktować jako zadanie optymalizacji, polegające na takim doborze wag modelu, aby zminimalizować wartość błędu *MAPE*. Czy w opinii Autora jest możliwe sformułowanie tego problemu w taki sposób?

5. W rozdziale 4.2.4 zaproponowana została „Hybrydowa integracja podejścia PSE S.A. i metody ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej”, czyli łączona metoda prognozowania obejmująca dwa modele prognostyczne – model stosowany przez polskiego OSP oraz model zaproponowany w rozprawie. Takie podejście, jak pisze Autor na stronie 117, powinno dać lepsze wyniki niż każdy model zastosowany z osobna. Na udowodnienie tej tezy Autor przytacza wyniki podejścia hybrydowego, dla którego wartości błędów *MAPE* podane zostały w tabelach 4.2.4.1, 4.2.4.4 i 4.2.4.5. Uzyskane wartości błędów *MAPE* są bardzo niskie, co sugeruje znakomitą poprawę wyników prognozowania. Należy jednak mieć na uwadze to, w jaki sposób przeprowadzono integrację obu podejść. Nie była to integracja metod, a integracja wyników uzyskanych przez obie metody. Dokonując integracji podejść dysponowano wynikami prognoz uzyskanych za pomocą obu metod oraz rzeczywistymi realizacjami prognozowanej zmiennej i z obu zbiorów wyników wybrano dla poszczególnych godzin te, które były bliższe stanowi faktycznemu. Tak postępując nie sposób było uzyskać gorsze rozwiązanie dla podejścia hybrydowego, w stosunku do obu podejść z osobna. Prognozowanie jest jednak procesem, którego trafność poznaje się dopiero w przyszłości. Zatem rodzi się tutaj pytanie w jaki sposób przeprowadzić hybrydyzację obu podejść prognostycznych nie znając rzeczywistej realizacji prognozowanej zmiennej?
6. W tabeli 4.4.1.1 prezentując wybrane modele prognostyczne zaliczane do kategorii metod autoregresyjnych Autor podaje wartości trzech czasów: czasu budowy modelu prognostycznego, czasu kalibracji modelu i czasu całkowitego, będącego ich sumą. W jaki sposób określono wartości czasu budowy i czasu kalibracji dla rozpatrywanych modeli prognostycznych?

#### Komentarze

1. W wykazie symboli „wartość zapotrzebowania na moc elektryczną w pojedynczej godzinie” została oznaczona za pomocą  $Y_n$ . W przypadku mocy czynnej standardowo stosowanym symbolem jest  $P$ . Z czego wynika zastosowana zmiana?
2. Na stronie 35 Autor pisze „Lektura Rysunku 1.3.2.3...”. Lektura to „czynność czytania”. W odniesieniu do rysunku raczej należałoby użyć sformułowania „analiza rysunku”.
3. Na stronie 35 można znaleźć zdanie „W przypadku jednostek konwencjonalnych i rosnącym średnim obciążeniu KSE mniejsza ich liczba będzie musiała przechodzić do wytwarzania na poziomie minimum technicznego i tym samym przy dużym udziale wytwarzania w źródłach wiatrowych będzie rzadko występowało ryzyko ograniczania ich generacji oraz jej wprowadzania do sieci przesyłowej generacji wiatrowej, w tym



- z niemieckiego elektroenergetycznego systemu przesyłowego...”. Podkreślona część zdania jest niejasna. Proszę o doprecyzowanie.
4. Zdanie na stronie 53 powinno brzmieć: „Środek ten przez wiele lat był stosowany zgodnie z tą regułą do bieżącej regulacji krzywej obciążenia, jednakże w ostatnich latach drugiej dekady dwudziestego pierwszego wieku przywoływane są do ruchu w trybie interwencyjnym.”.
  5. W tytule rozdziału drugiego znajduje się błąd literowy (powinno być „w systemie elektroenergetycznym”).
  6. Nieco zaskakujące jest stwierdzenie ze strony 64 – „Tym samym przegląd literatury przedmiotu nie powinien opierać się na długości tytułu publikacji”. Jest rzeczą oczywistą, że analiza literatury powinna się opierać na treści analizowanych źródeł, a nie na ich tytułach.
  7. W niektórych wzorach zamieszczonych w rozdziale trzecim nie wszystkie symbole w nich występujące zostały objaśnione. Przykładowo, we wzorze (3.1) nie wyjaśniono symbolu  $N$ , we wzorze (3.4) symboli  $f$  i  $r$ , a we wzorze (3.5) symboli  $\phi_{21}$  i  $\zeta$ . Nieprecyzyjne są również przywołania wzorów w tekście pracy, np. „W odniesieniu do wzoru na 95% przedział ufności...” (str. 81) – powinno być „W odniesieniu do wzoru (X.X) określającego 95% przedział ufności...”.
  8. W rozdziałach 3.4.1 i 3.4.2 Autor zamieszcza matematyczną postać modeli prognostycznych, które opracował w ramach realizacji swojej rozprawy doktorskiej (wzory (4.53) i (4.54)). W objaśnieniu wielkości występujących w obu wzorach brak jest jednak wyjaśnienia symboli  $P_{n-1}$ ,  $P_{n-2}$ ,  $P_{n-x}$  oraz  $r_{n-1}$ ,  $r_{n-2}$ ,  $r_{n-x}$ . Z wcześniejszej treści pracy można się domyślać, że są to odpowiednio wartości zapotrzebowania jakie wystąpiło o tej samej godzinie w dobach  $n - 1$ ,  $n - 2$  aż do  $n - x$ , gdzie  $x$  jest przyjętym opóźnieniem, a literą  $r$  oznaczono odpowiednie współczynniki autokorelacji (wagi modelu). Na marginesie, w wykazie symboli zapotrzebowanie na moc w pojedynczej godzinie oznaczono symbolem  $Y_n$  (patrz uwaga 1) – występuje tutaj zatem nieścisłość oznaczeń. We wzorach (4.53) i (4.54) brakuje znaku równości i wielkości wynikowej. W tym przypadku również można się domyślać, że jest to  $P_n$ , czyli zapotrzebowanie na moc czynną w danej godzinie doby  $n$ , czyli doby dla której jest opracowywana prognoza.
  9. W pracy brakuje zestawienia, np. tabelarycznego, przykładowych wartości wyznaczonych współczynników autokorelacji (wag modelu prognostycznego) dla modelu opracowanego np. dla danych historycznych zapotrzebowania w KSE. Zestawienie takie zobrazowałoby m.in. z jakimi wagami uwzględniane są coraz starsze realizacje prognozowanej zmiennej dla przyjętego w modelu opóźnienia czasowego.
  10. Opisane w rozdziale 3.4.2 nazwano „podejściem krokowym”. Może określeniem lepiej obrazującym to podejście byłoby „podejście kroczące”?

11. Na stronie 94, podano, że tabela 4.1.1.1 została opracowana na podstawie danych pochodzących ze strony internetowej PSE S.A. Niestety nie udało mi się dotrzeć do źródła tych danych na wskazanej stronie.
12. W rozdziałach 4.1.3 ÷ 4.1.5 Autor wykonuje ogólną analizę dopuszczalności prognoz uzyskiwanych za pomocą opracowanego w rozprawie modelu. Aby to zrobić wyniki prognoz odnosi do rzeczywistych danych o zapotrzebowaniu w KSE w okresie 2009 ÷ 2018, obliczając wartości błędów *MAPE*. Ocenę dopuszczalności przedstawia w tabelach 4.1.3.1 ÷ 4.1.5.4, zaznaczając odpowiednimi symbolami i kolorami godziny, w których prognoza okazała się bardzo dokładna, dokładna, dopuszczalna i niedopuszczalna. Następnie w rozdziale 4.2.2 Autor szczegółowo ocenia skuteczność prognoz, przedstawiając w tabelach 4.2.2.1 ÷ 4.2.2.9 obliczone wartości błędów *MAPE* dla poszczególnych godzin, przy czym występuje tutaj pełna analogia między wynikami zamieszczonymi w tabelach 4.1.3.1 ÷ 4.1.5.4, a wynikami przedstawionymi w tabelach 4.2.2.1 ÷ 4.2.2.9. Uważam, że wskazane tabele można było połączyć, podając wartość błędu *MAPE* w tabelach 4.1.3.1 ÷ 4.1.5.4 i zaznaczając kolorem te komórki, w których prognoza była bardzo dokładna, dokładna, dopuszczalna i niedopuszczalna. W ten sposób można było zmniejszyć nieco obszerność pracy, bez zmniejszenia zakresu przekazywanych czytelnikowi informacji.
13. Na stronie 100 Autor stwierdza, że „W grupie dni roboczych największym wyzwaniem z punktu widzenia opracowywania prognoz są poniedziałki, które następują po sobocie i niedzieli.”. Zdanie to sugeruje, że mogą być poniedziałki następujące również po innych dniach tygodnia.
14. Na stronie 101 można przeczytać, że „Podobnie jak w przypadku analizy przeprowadzonej dla pełnych lat wskazane wartości oznaczają bardzo wysoką jakość prognoz opracowywanych przez PSE S.A. w odniesieniu do prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE (czołowa pozycja w porównaniu do operatorów systemów elektroenergetycznych zrzeszonych w ENTSO – E).”. Czy można podać źródło danych uzasadniających twierdzenie o czołowej pozycji PSE S.A.?
15. W nagłówkach tabel, w których zestawione są wartości błędów *MAPE*, Autor podaje, że błędy te są wyrażone w procentach, zapisując symbol % w nawiasach kwadratowych, [%]. Zgodnie z zasadami pisowni tekstów technicznych (patrz artykuł „Jak pisać teksty techniczne poprawnie”, K. Pawluk) nawiasy kwadratowe nie powinny być stosowane.
16. Na stronie 122 Autor ocenia skuteczność prognoz uzyskiwanych przez operatorów szwedzkiego i francuskiego pisząc „Maksymalne wartości błędów *MAPE* (Tab. 4.3.1.3) za cały okres analizy zarówno dla systemu szwedzkiego (19,79%) jak i francuskiego (51,27%) kształtują się na znacząco różnych poziomach (z korzyścią dla systemu szwedzkiego). Odnotowywana wartość różnicy skuteczności pomiędzy oboma zagranicznymi systemami wynosi 31,48%.”. Różnica skuteczności nie wynosi 31,48% a 31,48 punktu procentowego (51,27% - 19,79% = 31,48 p. p.).

17. Spis literatury można było uporządkować w lepszy sposób, grupując pozycje literaturowe w odpowiednie kategorie (np. książki, artykuły, referaty konferencyjne, normy i przepisy prawne, źródła internetowe). Z uwagi na bardzo obszerny zestaw cytowanych źródeł Autor nie ustrzegł się pomyłek. Dla przykładu na stronie 49 zacytowana została pozycja [314], która na pewno nie dotyczy opisywanego w tym fragmencie pracy zagadnienia. W spisie literatury dwukrotnie ujęto tę samą pozycję (pozycje numer [229] i [230]).

Przestawione wyżej uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i pozostają bez wpływu na moją pozytywną ocenę rozprawy. Wszystkie ewentualne nieściśłości należy uznać za zrozumiałe, biorąc pod uwagę złożoność problemu badawczego i obszerność pracy.

## **5. Podsumowanie**

Ustawa „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (art. 187) wymaga, aby rozprawa doktorska: (i) prezentowała ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz (ii) umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a (iii) przedmiotem rozprawy było oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej. Jestem przekonany, że opiniowana rozprawa spełnia to wymaganie.

Wypełniając pierwsze wymaganie Autor umiejscowił analizowany przez siebie problem w szerszym kontekście, obejmującym aktualne warunki funkcjonowania sektora elektroenergetycznego. Znajomość zagadnień dotyczących energetyki wynika m.in. z pracy zawodowej Autora w Grupie Kapitałowej PSE S.A., w której od wielu lat realizuje projekty badawczo-rozwojowe związane z działalnością Operatora Systemu Przesyłowego oraz innych podmiotów działających na rynku energii. Wybrane wyniki swoich prac Autor systematycznie prezentuje w ramach publikacji naukowych i popularyzatorskich (jest autorem ponad 50 artykułów i referatów konferencyjnych, również dotyczących innych zagadnień niż tematyka recenzowanej rozprawy).

Spełnienie drugiego wymagania – umiejętność samodzielnej pracy naukowej – zostało udowodnione podczas realizacji pracy doktorskiej. Autor w rozprawie precyzyjnie określił obszar zainteresowania, jednoznacznie sformułował cel badań, a później konsekwentnie go realizował, udowadniając postawione hipotezy badawcze. Opracowana rozprawa zawiera wszystkie istotne elementy opracowania naukowego z obszaru nauk technicznych, obejmujące: omówienie najważniejszych problemów praktycznych dotyczących wybranej tematyki, genezę problemu badawczego, cel i tezę pracy, sformułowanie modelu matematycznego odpowiadającego analizowanemu problemowi, część obliczeniową, omówienie uzyskanych wyników, podsumowanie i wnioski oraz wykaz wykorzystanej literatury.

Wymaganie trzecie, mówiące że przedmiotem rozprawy powinno być oryginalne rozwiązanie problemu naukowego również zostało wypełnione. Jako najważniejsze osiągnięcie naukowe rozprawy uważam zaproponowanie i kompleksowe przetestowanie

nowego modelu prognostycznego, służącego do prognozowania globalnego zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym w horyzoncie następnej doby. Model ten z jednej strony jest prosty i bazuje jedynie na danych własnych posiadanych przez operatora, a z drugiej strony wyniki uzyskiwane z jego zastosowaniem cechują się wystarczającą dokładnością, aby można było je wykorzystać w sytuacjach, w których proces prognostyczny realizowany przez operatora z wykorzystaniem obecnie stosowanych modeli został zaburzony, np. na skutek braku dostępu do danych zewnętrznych. Istnieje zatem możliwość zastosowania wyników badań przeprowadzonych przez Autora w sferze gospodarczej.

## **6. Wniosek końcowy**

Biorąc pod uwagę przedstawioną wyżej ocenę stwierdzam, że opiniowana rozprawa Mgr inż. Rafała Czapaja pt. „Prognozowanie krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną metodą ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej” odpowiada wymaganiom ustawowym stawianym przed rozprawami doktorskimi (Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – Dz. U. 2018, poz. 1668) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony. Opiniowana rozprawa została zrealizowana w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

