

Wrocław, 2022.02.21

Dr hab. inż. Waldemar Dołęga prof. uczelni
Katedra Energoelektryki
Wydział Elektryczny

Politechnika Wroclawska
50-370 Wrocław
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27
tel. (71) 3203465
fax (71) 3202656
e-mail: Waldemar.dolega@pwr.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Czapaja
pt. „Prognozowanie krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną metodą
ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej”

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dyrektora Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN prof. dra hab. inż. Krzysztofa Galosa, przekazane pismem A0-520-17/21 z dnia 22.12.2022 wraz z egzemplarzem rozprawy doktorskiej, a otrzymanym w dniu 29.12.2022.

1. Przedmiot rozprawy

Bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej, które jest jednym z podstawowych celów polityki energetycznej państwa, obejmuje zdolność systemu elektroenergetycznego do zapewnienia bezpieczeństwa pracy sieci elektroenergetycznej oraz równoważenia dostaw energii elektrycznej z zapotrzebowaniem na tę energię.

Poziom bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej w znacznym stopniu zależy od właściwego funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE), a to wymaga m.in. właściwego prognozowania zapotrzebowania na moc i energię elektryczną w różnych horyzontach czasu. Przy czym prognozowanie krótkoterminowe, szczególnie w horyzoncie następnego dnia, ma kluczowe znaczenie dla ważnego narzędzia Operatora Systemu Przesyłowego (OSP) w kontekście niezawodności i ciągłości dostaw energii elektrycznej – Bieżącego Planu Koordynacyjnego Dobowego (BPKH).

Problem zapewnienia nieprzerwanych dostaw energii elektrycznej oraz pokrycie bieżącego i prognozowanego zapotrzebowania na moc i energię elektryczną przy uwzględnieniu różnego rodzaju ograniczeń jest zawsze bardzo ważny dla prawidłowego funkcjonowania gospodarki kraju.

Prognozowanie zapotrzebowania na moc elektryczną jest bardzo trudne i złożone bowiem jest procesem stochastycznym, cechującym się dużą zmiennością, uzależnionym od typu dnia, pory dnia, pory roku i roku. Ponadto zależy od bardzo wielu różnorodnych czynników natury: technicznej, ekonomicznej, prawnej i społecznej. W ostatnim okresie szczególnie ważne są zmiany klimatyczne, technologiczne i społeczne, które prowadzą do znacznych zmian zachowań odbiorców końcowych, co wpływa na modyfikację dobowych profili obciążenia KSE.

W horyzoncie krótkoterminowym szczególnie istotne dla OSP jest wyznaczenie ekstremów poboru mocy, zarówno w szczycie, jak i dolinie zapotrzebowania na moc elektryczną.

Waga prognozowania na moc elektryczną w różnych horyzontach czasu dla funkcjonowania systemu elektroenergetycznego sprawia, że problematyka prognozowania od bardzo wielu lat jest w centrum zainteresowania różnych ośrodków naukowo-badawczych w kraju i zagranicą, czego efektem jest wiele publikacji z tego zakresu dotyczących różnych aspektów prognozowania. Znajdują się wśród nich m.in. publikacje dotyczące metodyki krótkoterminowego prognozowania odnoszące się do systemów elektroenergetycznych.

Wprawdzie, jak wspomniano, problematyka krótkoterminowego prognozowania jest znana i bardzo popularna w sferze naukowo-badawczej, to jednak waga, złożoność i wieloaspektowość problemu, ogromne zmiany klimatyczne, technologiczne i społeczne oraz dynamicznie zmieniające się uwarunkowania funkcjonowania KSE sprawiają, że istnieje potrzeba opracowania odpowiedniej, skutecznej i efektywnej metodyki prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną wykorzystującą różne elementy i narzędzia, w tym metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej. Dlatego podjęcie tematu w ramach rozprawy doktorskiej przez Doktoranta było uzasadnione, właściwe i świadczy o bardzo dużym rozeznaniu w problematyce dotyczącej funkcjonowania KSE oraz prognozowania zapotrzebowania na moc i energię elektryczną. Doktorant znalazł we wspomnianym obszarze naukowo-badawczym własny obszar realizując oryginalny, wartościowy i ważny dla gospodarki kraju program badawczy pozwalający na kompleksowe opracowanie metodyki prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną w oparciu o metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej.

Program ten dotyczy bezpośrednio Operatora Systemu Przesyłowego, który jest najważniejszym podmiotem w zakresie bezpieczeństwa energetycznego kraju. Przeprowadzone przez Doktoranta badania mogą być wykorzystane do realizacji procesu prognozowania krótkoterminowego przez OSP np. do wyznaczenia ekstremów poboru mocy elektrycznej w szczycie i dolinie zapotrzebowania.

2. Przegląd treści rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska liczy łącznie 193 stron, 100 tabel, 23 rysunków i 378 pozycji literaturowych. Składa się z 4 rozdziałów poprzedzonych wykazem ważniejszych skrótów i pojęć w języku polskimi, wykazem ważniejszych skrótów i pojęć w języku angielskim, wykazem symboli i wprowadzeniem oraz uzupełnionych podsumowaniem i wnioskami końcowymi, bibliografią, spisem rysunków, spisem tabel, streszczeniem w języku polskim i streszczeniem w języku angielskim. Ponadto elementem rozprawy doktorskiej jest osobny załącznik obejmujący 256 stron, 363 tabel i 35 rysunków przedstawiający wybrane wyniki analiz i symulacji prognostycznych.

We wprowadzeniu przedstawiono zagadnienie prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE, które stanowi obszar badawczy Doktoranta oraz przedmiot, cel główny, cele cząstkowe, hipotezy badawcze, metodykę badawczą i strukturę rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 1 (Tło problematyki prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną) przedstawiono problematykę prognozowania w kontekście ekonometrii, statystyki oraz energetyki i elektroenergetyki. Ponadto przeanalizowano prognozowanie na tle planowania zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE oraz przedstawiono zagadnienie pokrywania zapotrzebowania na moc elektryczną w systemie elektroenergetycznym.

W rozdziale 2 (Stan badań w obszarze prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną w systemie elektroenergetycznym) przedstawiono przegląd literatury na

przestrzeni ostatnich 25 lat dotyczącej prac badawczych z obszaru krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną realizowanych w kraju i zagranicą.

W rozdziale 3 (Opracowanie modelu matematycznego do prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną wykorzystującego metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej) przedstawiono szczegółowy opis modelu matematycznego wykorzystującego metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej obejmujący takie elementy jak: zarys teoretyczny; podstawy teoretyczne funkcji korelacji; koncepcja i założenia metody ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej; formuły matematyczne modelu wykorzystującego metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej (podejście klasyczne, podejście krokowe); założenia i dane wejściowe; procedura badawcza oraz porównanie podejścia klasycznego i podejścia krokowego.

W rozdziale 4 (Walidacja opracowanego modelu do prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną wykorzystującego metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej) przedstawiono walidację modelu ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej w trzech obszarach: Krajowego Systemu Elektroenergetycznego; systemów elektroenergetycznych Francji i Szwecji oraz w porównaniu z wybranymi metodami autoregresyjnymi: ARIMA, naiwną, naiwną z opóźnieniem siedmiu dób oraz naiwną z opóźnieniem jednej doby.

W podsumowaniu i wnioskach końcowych przedstawiono podsumowanie, uwagi i wnioski końcowe związane z realizacją pracy doktorskiej oraz nakreślono kierunki dalszych badań Doktoranta w obszarze krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną.

W bibliografii przedstawiono obszerną literaturę do pracy doktorskiej, która obejmuje 378 pozycji literaturowych. Znajdują się wśród nich: monografie, podręczniki akademickie, artykuły, referaty konferencyjne i inne opracowania związane z przedmiotem badań realizowanym przez Doktoranta.

W załączniku przedstawiono ważne analizy zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE, przykładowe profile obciążenia systemów elektroenergetycznych i wyniki różnorodnych symulacji prognostycznych umożliwiającą porównanie skuteczności w trzech obszarach weryfikacji dla: lat analizy i typów dni; dni świątecznych i niestandardowych; dni tygodnia w poszczególnych latach; wszystkich dni świątecznych i niestandardowych oraz Wigilii Świąt Bożego Narodzenia.

3. Ocena merytoryczna treści rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest bardzo wartościowym i oryginalnym opracowaniem naukowym zarówno pod względem poznawczym jak i praktycznym, zawierającym bardzo obszerne i ciekawe wyniki badań analitycznych i symulacyjnych.

Prawidłowo uzasadniono cel główny badań polegający na opracowaniu autoregresyjnej metody do prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną, cechującej się co najmniej dopuszczalną jakością prognoz określaną wartościami średniego bezwzględnego błędu procentowego MAPE w przedziale (4,00%; 6,00%), ze szczególnym uwzględnieniem pierwszych sześciu godzin doby oraz dla dni świątecznych i niestandardowych. Przyjęto właściwie cele cząstkowe, które warunkowały osiągnięcie głównego celu pracy. Wiązały się one z:

- identyfikacją dynamicznych zmian zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE dla potrzeb opracowania nowej autoregresyjnej metody prognozowania;
- opracowaniem nowej elastycznej metody prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE, wykorzystującej ważne współczynniki funkcji autokorelacji

cząstkowej, możliwej do zastosowania również w zagranicznych systemach elektroenergetycznych;

- opracowaniem i oceną prognoz ex post zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE dla każdej godziny doby, w podziale na pierwsze sześć i pozostałych osiemnaście godzin oraz w podziale na dni świąteczne i niestandardowe;
- opracowaniem i oceną prognoz ex post zapotrzebowania na moc elektryczną w wybranych zagranicznych systemach elektroenergetycznych oraz na tle wybranych autoregresyjnych metod prognozowania dla każdej godziny doby, w podziale na pierwsze sześć i pozostałych osiemnaście godzin oraz w podziale na dni świąteczne i niestandardowe.

Właściwie sformułowano trzy hipotezy badawcze w brzmieniu:

I. 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.

II. 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.

III. 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.

Tak więc, zarówno cel główny, cele cząstkowe jak i trzy hipotezy badawcze rozprawy doktorskiej zostały dostatecznie jasno sformułowane przez Doktoranta.

Bardzo cenna jest realizacja, w ramach rozprawy doktorskiej, ogromnej liczby symulacji prognostycznych dla KSE, szwedzkiego systemu elektroenergetycznego i francuskiego systemu elektroenergetycznego oraz dla osiemdziesięciu modeli spośród ośmiu grup wybranych metod prognozowania z wykorzystaniem danych i prognoz historycznych dla KSE i porównanie jakości, efektywności i skuteczności prognoz. Skala tych analiz i symulacji jest niespotykana w krajowych publikacjach i opracowaniach dotyczących prognozowania krótkoterminowego.

Problem naukowo-badawczy przedstawiony przez Doktoranta we Wprowadzeniu został rozwiązany w rozdziale 3 (Opracowanie modelu matematycznego do prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną wykorzystującego metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej) i zweryfikowany i oceniony na drodze wspomnianych już symulacji w rozdziale 4 (Walidacja opracowanego modelu do prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną wykorzystującego metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej) i Załączniku. Weryfikację i ocenę poparto syntetyczną dyskusją uzyskanych wyników przedstawioną w podrozdziale 4.5 (Podsumowanie dla trzech obszarów walidacji opracowanego modelu). Cała realizacja problemu naukowo-badawczego została podsumowana w Podsumowaniu i wnioskach końcowych.

Rozwiązanie problemu poprzedziły wieloaspektowa analiza procesu prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną przedstawiona w rozdziale 1 (Tło problematyki prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną) oraz obszerny przegląd literatury z ostatnich 25 lat dotyczący prac naukowo-badawczych z obszaru krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną realizowanych w kraju i zagranicą przedstawiony w rozdziale 2 (Stan badań w obszarze prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną w systemie elektroenergetycznym).

Doktorant przeprowadził złożone i bardzo liczne badania analityczne i symulacyjne w zakresie dotyczącym prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną wykorzystującego

metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej w trzech obszarach: Krajowego Systemu Elektroenergetycznego; systemów elektroenergetycznych Francji i Szwecji oraz w porównaniu z wybranymi metodami autoregresyjnymi: ARIMA, naiwną, naiwną z opóźnieniem siedmiu dób oraz naiwną z opóźnieniem jednej doby. Analizy i symulacje dotyczyły: lat analizy i typów dni; dni świątecznych i niestandardowych; dni tygodnia w poszczególnych latach; wszystkich dni świątecznych i niestandardowych oraz Wigilii Świąt Bożego Narodzenia. Ponadto obejmowały dwa przedziały doby: pierwsze 6 godzin doby (0.00-5.00) i następne 18 godzin doby (6.00-23.00).

Opracowana przez Doktoranta w ramach rozprawy doktorskiej metodyka prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną metodą ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej ma dużą wartość zarówno poznawczą jak i praktyczną. Może być wykorzystana, jak wspomniano, do realizacji procesu prognozowania krótkoterminowego przez OSP np. do wyznaczenia ekstremów poboru mocy elektrycznej w szczycie i dolinie zapotrzebowania.

Lista głównych elementów pracy badawczej realizowanej w ramach rozprawy doktorskiej wiąże się bezpośrednio, ze wspomnianymi już wcześniej celami cząstkowymi, które warunkowały osiągnięcie głównego celu pracy.

4. Ocena struktury rozprawy doktorskiej, podziału treści i poprawności językowej

Praca napisana jest w sposób bardzo staranny, jasny i zrozumiały przy użyciu bardzo dobrego języka naukowo-technicznego. Doktorant używa właściwej terminologii i zrozumiałych zwrotów technicznych. Przedstawia problematykę płynnie. Liczba błędów gramatycznych, edycyjnych (literówek) i interpunkcyjnych jest bardzo mała. Szata graficzna pracy jest właściwa. Praca jest bardzo dobrze zilustrowana, zawiera 100 tabel i 23 rysunki w części głównej oraz 363 tabel i 35 rysunków w załączniku.

Struktura pracy oraz podział treści na rozdziały jest właściwa i została przedstawiona w punkcie 2 recenzji (Przegląd treści rozprawy).

Na początku rozprawy we Wprowadzeniu zasygnalizowano obszar badawczy dotyczący prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE oraz przedmiot, cel główny, cele cząstkowe, hipotezy badawcze, metodykę badawczą i strukturę rozprawy doktorskiej. Jest to jedno z naturalnych miejsc, gdzie powinno nastąpić umiejscowienie własnych zamierzeń Doktoranta, które chce zrealizować w ramach rozprawy doktorskiej.

Rozdziały 1 i 2 mają walor poznawczy i analityczny i stanowią podbudowę teoretyczną dla realizowanych badań nakreślając: problematykę prognozowania w kontekście ekonometrii, statystyki oraz energetyki i elektroenergetyki; prognozowanie na tle planowania zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE; problematykę pokrywania zapotrzebowania na moc elektryczną w systemie elektroenergetycznym oraz prace badawcze z obszaru krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną realizowane w kraju i zagranicą.

Przedstawiona we wspomnianych rozdziałach wieloaspektowa i dogłębna analiza prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną oraz szeroka i dogłębna analiza źródeł literaturowych w zakresie prac naukowo-badawczych i stanu wiedzy w obszarze krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną jest właściwa i nie budzi zastrzeżeń.

Rozdziały 3 i 4 oraz załącznik o charakterze analitycznym i symulacyjnym dotyczą bezpośrednio zaproponowanego przez Doktoranta rozwiązania problemu naukowo-badawczego i przeprowadzonych przez Niego badań symulacyjnych, mających na celu wszechstronną walidację opracowanej metody.

W rozdziale 3 Doktorant przedstawił szczegółowy opis opracowanego modelu matematycznego wykorzystującego metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej obejmujący takie elementy jak: zarys teoretyczny; podstawy teoretyczne funkcji korelacji; koncepcja i założenia metody ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej; formuły matematyczne modelu wykorzystującego metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej (podejście klasyczne, podejście krokowe); założenia i dane wejściowe; procedura badawcza oraz porównanie podejścia klasycznego i podejścia krokowego.

Opis metody przedstawiono w sposób właściwy, wyczerpujący i nie budzący wątpliwości. Wzory, zależności, symbole i oznaczenia są poprawne i właściwie opisane, nie budzą zastrzeżeń.

W rozdziale 4 i załączniku Doktorant przeprowadził walidację opracowanego modelu do prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną i przedstawił wyniki symulacji prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną wykorzystującego metodę ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej w trzech obszarach: Krajowego Systemu Elektroenergetycznego; systemów elektroenergetycznych Francji i Szwecji oraz w porównaniu z wybranymi metodami autoregresyjnymi: ARIMA, naiwną, naiwną z opóźnieniem siedmiu dób oraz naiwną z opóźnieniem jednej doby. Analizy i symulacje dotyczyły: lat analizy i typów dni; dni świątecznych i niestandardowych; dni tygodnia w poszczególnych latach; wszystkich dni świątecznych i niestandardowych oraz Wigilii Świąt Bożego Narodzenia. Ponadto obejmowały dwa przedziały doby: pierwsze 6 godzin doby (0.00-5.00) i następne 18 godzin doby (6.00-23.00).

Zakres i forma przeprowadzonej walidacji metody prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną poprzez realizowane przez Doktoranta symulacje jest właściwa. Zastosowane przez Doktoranta opisy i prezentacje założeń, danych i wyników obliczeń symulacyjnych są usystematyzowane, właściwe i dobrze zilustrowane w postaci tabel i rysunków. Nie budzą zastrzeżeń. Doktorant przeprowadził wnikliwe obserwacje dotyczące uzyskanych wyników symulacji prognostycznych, usystematyzowaną dyskusję i wszechstronną analizę uzyskanych wyników.

Problem naukowo-badawczy postawiony przez Doktoranta został w pełni rozwiązany i właściwie zweryfikowany.

Praca została zakończona ciekawym podsumowaniem i wnioskami końcowymi związanymi z realizacją pracy doktorskiej odnoszącymi się do celu głównego, celi cząstkowych i hipotez badawczych oraz nakreśleniem kierunków dalszych prac związanych z prognozowaniem krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE. Przedstawione przez Doktoranta kierunki określają przyszłe obszary Jego aktywności naukowo-badawczej, dla których przedstawiona przez Doktoranta ciekawa i wartościowa rozprawa doktorska stanowi ważny element tej aktywności.

W bibliografii przedstawiono obszerną literaturę do pracy doktorskiej, która obejmuje 378 pozycji literaturowych. Znajdują się wśród nich: monografie, podręczniki akademickie, artykuły, referaty konferencyjne i inne opracowania związane z przedmiotem badań realizowanym przez Doktoranta. Pozycje te są właściwie dobrane i odpowiednie w stosunku do tematyki rozprawy doktorskiej. Ponadto są to w zdecydowanej większości aktualne publikacje, często napisane w języku angielskim i opublikowane w renomowanych czasopiśmie branżowych znajdujących się na liście JCR. Publikacje zamieszczone są w kolejności alfabetycznej, a nie w kolejności cytowania w tekście rozprawy, co może stanowić pewien problem dla czytelnika w kontekście obszerności rozprawy doktorskiej. W tekście znajdują się odwołania do zamieszczonych publikacji, a Doktorant cytuje je obszernie, prawidłowo i we właściwych miejscach swojej rozprawy, co świadczy o ich dobrej

znajomości przez Doktoranta i wskazuje, że analiza źródeł literaturowych jest właściwie zrealizowana.

Rozprawa doktorska opracowana przez Doktoranta jednoznacznie wskazuje, że Doktorant w bardzo dobrym stopniu opanował umiejętność redagowania rozpraw i tekstów naukowych. Lektura rozprawy jest ciekawa i interesująca. Doktorant bardzo dobrze czuje się w tematyce dotyczącej funkcjonowania systemów elektroenergetycznych zarówno krajowego jak i zagranicznych oraz prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną w tych systemach. Doktorant ma bardzo dużą wiedzę w tych obszarach i potrafi to przedstawić w sposób jasny i zrozumiały w tekście rozprawy.

5. Główne osiągnięcia Doktoranta

Głównym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie nowej autoregresyjnej metody do prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną, cechującej się co najmniej dopuszczalną jakością prognoz (tj. wartościami średniego bezwzględnego błędu procentowego MAPE w przedziale (4,00%; 6,00%)), ze szczególnym uwzględnieniem pierwszych sześciu godzin doby oraz dla dni świątecznych i niestandardowych, która może stanowić bardzo pomocne narzędzie dla Operatora Systemu Przesyłowego.

6. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

1. Str. 12-15, 30-54 – Rozprawa doktorska dotyczy prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE i ma bezpośredni związek z działalnością Operatora Systemu Przesyłowego - spółki Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., która zajmuje się przesyłaniem energii elektrycznej i jest odpowiedzialna: za ruch sieciowy w systemie przesyłowym, bieżące i długookresowe bezpieczeństwo funkcjonowania tego systemu, eksploatację, konserwację, remonty oraz niezbędną rozbudowę sieci przesyłowej, w tym połączeń z innymi systemami elektroenergetycznymi. W rozprawie doktorskiej brak jest jednak nawet skrótowej informacji o strukturze KSE i przedsiębiorstwach energetycznych prowadzących koncesjonowaną działalność w sektorze elektroenergetycznym. Brak jest również informacji o roli, zadaniach i obowiązkach OSP oraz o uwarunkowaniach prawnych jego funkcjonowania. Te informacje w wersji szczytkowej i wybiórczej odnoszącej się tylko do kontekstu procesu prognozowania są umieszczone w różnych miejscach pracy. Natomiast uwarunkowania prawne są prawie całkowicie pominięte, jedynie na str. 14 znajduje się wzmianka o ustawie z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo Energetyczne (T.j. Dz. U. z 2020 r., poz. 833 z późn. zm.), która stanowi podstawowy i najważniejszy akt prawny dotyczący funkcjonowania sektora elektroenergetycznego. Doktorant nie umieścił też w Bibliografii żadnego aktu prawnego. Recenzent uważa, że zamieszczenie wspomnianych elementów w formie krótkiego rozdziału przez Doktoranta wprawdzie zwiększyłoby objętość pracy, ale stanowiłoby cenne uzupełnienie rozprawy doktorskiej. Proszę o wyjaśnienie czym spowodowany jest brak wspomnianych elementów w rozprawie doktorskiej. Czy wynikał on z przyjętej koncepcji rozprawy doktorskiej i czy miał związek z jej obszernością.
2. Str. 14 – We Wprowadzeniu Doktorant stwierdza, że rozprawa wpisuje się w dynamiczne zmiany technologiczne wynikające z uwarunkowań legislacyjnych związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa cybernetycznego. Proszę rozszerzenie tego wątku i przedstawienie wspomnianych uwarunkowań prawnych odnoszących się do bezpieczeństwa cybernetycznego które determinują wspomniane zmiany technologiczne i wymuszają stosowanie metod i modeli prognostycznych odpornych na zakłócenia w dostawach danych od dostawców zewnętrznych w KSE.

3. Str. 14, 18, 19, 21, 24, 30, 35, 48, 52, 57, 58, 59, 60, 61, 64 – Dlaczego Doktorant w wielu miejscach rozprawy doktorskiej nie stosuje kolejności numeracji publikacji w sytuacji gdy dotyczy to wielu publikacji, a przyjmuje dowolną kolejność np. „... (a w szczególności dla szczytów [69], [215], [184], [264])...” (str.14); „...na podstawie znajomości modelu ekonometrycznego [139], [217], [313], [260], [111], [176]...” (str.18); „modelem rzeczywistego procesu [217], [344], [142].” (str.18) ?
4. Str. 33 – Proszę o wyjaśnienie rys. 1.3.2.1. Zmienność średniego obciążenia dobowego KSE w latach 2009 – 2018 na tle średnich wartości wybranych parametrów meteorologicznych monitorowanych przez IMGW na terenie Polski. W ocenie Recenzenta rys. 1.3.2.1. określa zmienność średniego obciążenia dobowego KSE w konkretnym ustalonym roku z okresu 2009 – 2018 (a nie dla całego okresu jak jest to w opisie) na tle średnich wartości wybranych parametrów meteorologicznych monitorowanych przez IMGW na terenie Polski.
5. Str. 61 – Doktorant stwierdza w rozprawie „Strumienie danych zasilających zbiory *Big Data* w przesyłowych i dystrybucyjnych systemach elektroenergetycznych pochodzą m.in. z układów IED (ang. *Intelligent Electronic Device*)”. Określenie układy IED zastosowane przez Doktoranta jest niewłaściwe i powinno być zastąpione przez urządzenia IED. Inteligentne urządzenia elektroniczne IED (ang. *Intelligent Electronic Device*) stanowią urządzenia wyposażone w mikroprocesor umożliwiający wykonywanie zaawansowanych funkcjonalności, tj. realizowanie automatyk (zabezpieczeniowych, regulacyjnych, itp.), monitorowanie i sterowanie procesami oraz komunikację z systemami nadrzędnymi. Najczęściej są to: zabezpieczenia cyfrowe, sterowniki polowe i regulatory. Trudno tu mówić o układach.
6. Str. 64 – Doktorant przedstawiając pełny wykaz dla zbiorczego zestawienia skrótów zastosowanych dla metod i modeli prognostycznych w zbiorze Top 10 powiela trzykrotnie skrót SSN: SSN – sztuczna sieć neuronowa; SSN – sztuczna sieć neuronowa falkowa; SSN – sztuczna sieć neuronowa. Występuje więc powtórzenie skrótu i brak rozróżnienia pomiędzy sztuczną siecią neuronową a sztuczną siecią neuronową falkową.
7. Str. 64 – Doktorant opisując systemy elektroenergetyczne poddane analizom prognostycznym w zestawieniu Top 10, pisze że są to (w kolejności narastającej) systemy Iranu (2 pozycje), USA (1 pozycja), Iranu (3 pozycje), USA (1 pozycja), Australii (3 pozycje). Następuje więc powielenie systemów elektroenergetycznych w odniesieniu do Iranu i USA. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.
8. Str. 89 - Doktorant zamieścił niewłaściwą numerację wzorów odnoszących się do podejścia klasycznego (4.53) i podejścia krokowego (4.54) i odwołań do tych wzorów w tekście podrozdziałów 3.4.1 i 3.4.2. Powinno być odpowiednio 3.53 i 3.54.
9. Str. 93 – W tabeli 3.7.1. przedstawiającej skuteczność roczną prognoz osiągniętych przy pomocy metody ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej w kontekście skuteczności prognoz w ramach BPKD (podejście klasyczne a podejście krokowe) wyrażonej wartościami błędu MAPE Doktorant używa do określenia różnicy odpowiednio: 1 a 2 i 3 a 2. Dlaczego nie jest to przedstawione w czytelnej formie: 1 – 2 i 3 – 2 ?
10. Str. 108 – Dlaczego dzień powszedni (roboczy) 31 grudnia (Sylwestra) Doktorant opisuje jako Święto Sylwestra np. „...Dla Święta Sylwestra najmniejszym błędem...”.
11. Str. 152 – Doktorant stwierdza, że zaproponowana metoda ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej w godzinach 00:05:00 jest mniej skuteczna o wartość poniżej 1,00% w środy, czwartki i piątki dla SEE Szwecji, Finlandii i Francji. Dlaczego znajduje się tutaj informacja o systemie elektroenergetycznym Finlandii, który nie był przedmiotem badań Doktoranta ?

12. Str. 156–162 - W Podsumowaniu i wnioskach końcowych, w ocenie Recenzenta, powinna znaleźć się lista istotnych własnych osiągnięć Doktoranta uzyskanych w ramach rozprawy doktorskiej. Proszę o jej podanie.
13. Str. 156–162 - Poziom rezerwy mocy dyspozycyjnej stanowi kluczowy parametr planistyczny do oceny bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej. Umożliwia pokrycie wszystkich możliwych odchyłeń od przyjętych założeń planistycznych w tym nieplanowe postoje lub wymuszone zaniżenia mocy jednostek wytwórczych. Margines rezerwy wymagany przez OSP gwarantuje dla każdego szczytu dobowego nadwyżkę mocy w stosunku do zapotrzebowania. Przy czym obliczone, w ramach poszczególnych planów koordynacyjnych, rezerwy mocy OSP w stosunku do zapotrzebowania do pokrycia przez elektrownie krajowe powinny wynosić odpowiednio 14% - dla Bilansu Techniczno-Handlowego Dobowego. Ponadto dla Bieżącego Planu Koordynacyjnego Dobowego sumaryczna planowana rezerwa mocy OSP dostępna w czasie nie dłuższym niż 1 godzina powinna wynosić minimum 9% planowanego zapotrzebowania do pokrycia przez elektrownie krajowe. Czy opracowana przez Doktoranta metoda prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE, wykorzystująca ważone współczynniki funkcji autokorelacji cząstkowej może być w jakimś stopniu wykorzystana w ocenie bezpieczeństwa dostaw energii ?
14. Str. 156–162 - Opracowana przez Doktoranta metoda prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną w KSE wykorzystująca ważone współczynniki funkcji autokorelacji cząstkowej może być wykorzystana przez OSP w procesie prognozowania jako narzędzie: podstawowe, dodatkowe, uzupełniające, weryfikujące czy awaryjne, które ma zastosowanie: tylko do pierwszych sześciu godzin doby, w szerszym lub pełnym wymiarze godzin dla dni standardowych czy ograniczonym, szerszym lub pełnym wymiarze godzin dla dni niestandardowych czy ograniczonym, szerszym lub pełnym wymiarze godzin dla dni świątecznych. Proszę o informacje w tej kwestii i nakreślenie przez Doktoranta obszaru wykorzystania opracowanej metody.
15. Str. 174 – Pozycja w bibliografii Mielczarski W. 2000. Rynki energii elektrycznej - Wybrane aspekty techniczne i ekonomiczne. Agencja Rynku Energii S.A. Warszawa. 2000 została wymieniona dwukrotnie pod numerem [229] i [230].
16. Str. 175 – W bibliografii Doktorant zamieścił pod numerem [255] tylko pozycję Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. 2020. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej: Bilansowanie systemu i zarządzanie ograniczeniami systemowymi (2010 z późniejszymi zmianami). Warszawa. 2020, a więc część IRiESP dotyczącą bilansowania i zarządzania ograniczeniami systemowymi, i pominął część ogólną IRiESP (Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci. Tekst jednolity. PSE S.A. Warszawa, 2021) w której znajdują się postanowienia istotne również dla obszaru badań realizowanych przez Doktoranta. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej stanowi najważniejszy dokument techniczny OSP i w ocenie Recenzenta powinna być w całości, a nie tylko w części dotyczącej bilansowania i zarządzania ograniczeniami systemowymi uwzględniana przez Doktoranta.
17. Załącznik str. 52 – Na rys. 4.4. Profil dobowy obciążenia polskiego systemu elektroenergetycznego w trzecią środę lipca 2018 r. Doktorant podał błędnie oznaczenia. Na osi pionowej jest „Obciążenie KSE (17.01.2018 r.), [MW]” a powinno być „Obciążenie KSE (18.07.2018 r.), [MW]”. Ponadto w opisie czerwonym kolorem oznaczono „18.07.2018 02:00”, a powinno być „SEE w Polsce (W)” gdzie W określa wykonanie prognozy.
18. Załącznik str. 53 – Na rys. 4.5. Profil dobowy obciążenia szwedzkiego systemu elektroenergetycznego w trzecią środę stycznia 2018 r. Doktorant podał błędnie

oznaczenia. Na osi pionowej jest „Obciążenie KSE (17.01.2018 r.), [MW]” a powinno być „Obciążenie SEE Szwecji (17.01.2018 r.), [MW]”.

19. Załącznik str. 53 – Na rys. 4.6. Profil dobowy obciążenia szwedzkiego systemu elektroenergetycznego w trzecią środę lipca 2018 r. Doktorant podał błędnie oznaczenia. Na osi pionowej jest „Obciążenie KSE (17.01.2018 r.), [MW]” a powinno być „Obciążenie SEE Szwecji (18.07.2018 r.), [MW]”. Ponadto w opisie czerwonym kolorem oznaczono „18.07.2018”, a powinno być „SEE w Szwecji (W)” gdzie W określa wykonanie prognozy.
20. Załącznik str. 54 – Na rys. 4.7. Profil dobowy obciążenia francuskiego systemu elektroenergetycznego w trzecią środę stycznia 2018 r. Doktorant podał błędnie oznaczenia. Na osi pionowej jest „Obciążenie KSE (17.01.2018 r.), [MW]” a powinno być „Obciążenie SEE Francji (17.01.2018 r.), [MW]”.
21. Załącznik str. 54 – Na rys. 4.8. Doktorant popełnił 3 błędy. Doktorant w tytule rys. 4.8. podał „Profil dobowy obciążenia szwedzkiego systemu elektroenergetycznego w trzecią środę lipca 2018 r.” podczas gdy jest to „Profil dobowy obciążenia francuskiego systemu elektroenergetycznego w trzecią środę lipca 2018 r.”. Ponadto Doktorant podał błędnie oznaczenia. Na osi pionowej jest „Obciążenie KSE (17.01.2018 r.), [MW]” a powinno być „Obciążenie SEE Francji (18.07.2018 r.), [MW]”. Dodatkowo w opisie żółtym kolorem oznaczono „18.07.2018”, a powinno być „SEE we Francji (W)” gdzie W określa wykonanie prognozy.

Przedstawione powyżej uwagi szczegółowe i dyskusyjne nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy i nie umniejszają osiągnięć Doktoranta.

7. Uwagi redakcyjne

Usterki redakcyjne w rozprawie doktorskiej dotyczą błędów gramatycznych, edycyjnych (literówek) i interpunkcyjnych. Liczba tych usterek jest mała.

Błędy gramatyczne wiążą się z niewłaściwą formą zdania: (str.22) „...Do metod służących do usuwania z zagadnienia prognostycznego...” , które powinno brzmieć „...Do metod służących usuwaniu z zagadnienia prognostycznego...”; (str.35) „...występowało ryzyko ograniczania ich generacji oraz jej wprowadzania do sieci przesyłowej generacji wiatrowej...”, które powinno brzmieć „...występowało ryzyko ograniczania ich generacji oraz wprowadzania do sieci przesyłowej generacji wiatrowej...”; (str.54) „...jest możliwe dzięki zastosowaniu m.in. środków tj. [242] środki ekonomiczne, techniczne, organizacyjne i informacyjne...”, które powinno brzmieć „...jest możliwe dzięki zastosowaniu m.in. środków ekonomicznych, technicznych, organizacyjnych i informacyjnych [242]...”; (str.88) „...pętla obliczeniowa zakańczana jest po osiągnięciu *i* po czym możliwe jest wyprowadzenie wyników obliczeń w funkcji *i*...”, które powinno brzmieć „...pętla obliczeniowa kończy się po osiągnięciu *i* po czym możliwe jest wyprowadzenie wyników obliczeń w funkcji *i*...”.

Błędy edycyjne pojawiają się na: str. 15 („...prognoz zaporzebowania...”, a powinno być „...prognoz zapotrzebowania...”); str. 18 („...ekonomią matematyczną...”, a powinno być „...ekonomią matematyczną...”); str. 23 („...[52, [56], [51].” a powinno być („...[52], [56], [51].”); str. 25 („...na znacniu...”, a powinno być „...na znaczeniu...”); str. 49 („...rozkładający prognozy...”, a powinno być „...rozkładający prognozy...”); str. 51 („...występowaniem koniecznością bieżącego bilansowania...”, a powinno być „...występowaniem konieczności bieżącego bilansowania ...”); str. 64 („...natomiast pełny wykaz skrótów zamieszczono w w Tabeli 2.1:...”, a powinno być „...natomiast pełny wykaz skrótów zamieszczono w Tabeli 2.1: ...”); str. 64 („...prędkości wiatru, Sztuczna sieć neuronowa falkowa (przetestowana na systemie australijskim), Sztuczna sieć neuronowa (analizowana dla systemu australijskiego),

Logika rozmyta (zastosowana dla systemu australijskiego)...”, a powinno być „...prędkości wiatru, sztuczna sieć neuronowa falkowa (przetestowana na systemie australijskim), sztuczna sieć neuronowa (analizowana dla systemu australijskiego), logika rozmyta (zastosowana dla systemu australijskiego)...”); str. 85 („autokowariancji $c_{-l}=c_l...$ ”, a powinno być „autokowariancji $c_{-l}=c_l...$ ”); str. 89 („...prognozowania zapotrzebowania na moc elektryczną...”, a powinno być „...prognozowania każdej godziny...”); str. 95 („...funkcji autokorelacji cząstkowej są spełniają kryterium...”, a powinno być „...funkcji autokorelacji cząstkowej spełniają kryterium...”); str. 102, str. 103, str. 107 („...dla dni Świątecznych i niestandardowych...”, a powinno być „...dla dni świątecznych i niestandardowych...”); str. 118 („...osiąganej przez PSE S.A. ...”, a powinno być „...osiąganej przez PSE S.A. ...”); str. 141 („Wigilii świąt Bożego Narodzenia...”, a powinno być „Wigilii Świąt Bożego Narodzenia...”); str. 156 („...wykorzystujące w procesie prognostycznym wyłączenie dane i informacje o historycznych wartościach...”, a powinno być „...wykorzystujące w procesie prognostycznym wyłącznie dane i informacje o historycznych wartościach...”); str. 176 („Samul K., Korab R., Cetnarski R., Wawrzyniak K., Kadłubowska A...”, a powinno być „Samul K., Korab R., Cetnarski R., Wawrzyniak K., Kadłubowska A...”); Załącznik str. 10 („temperatura otoczenia...”, a powinno być „temperatura otoczenia ...”); Załącznik str. 52 – legenda do rys. 4.3 i legenda do 4.4 („SEE w P*olsce...”, a powinno być „SEE w Polsce ...”); Załącznik str. 53 – legenda do rys. 4.6 („SEE w Szwecji (P*)...”, a powinno być „SEE w Szwecji (P) ...”); Załącznik str. 54 – legenda do rys. 4.8 („SEE we Francji (P*)...”, a powinno być „SEE we Francji (P) ...”).

Informacje o błędach interpunkcyjnych zostały naniesione ołówkiem przez Recenzenta na otrzymanym egzemplarzu rozprawy doktorskiej z załącznikiem wraz z propozycjami zmian.

Przedstawione powyżej uwagi redakcyjne nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy i nie umniejszają osiągnięć Doktoranta.

8. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgra inż. Rafała Czapaja stanowi wartościowe i oryginalne opracowanie, które przedstawia rozwiązanie aktualnego i ważnego dla funkcjonowania systemu elektroenergetycznego w kraju problemu naukowego dotyczącego opracowania metodyki prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną metodą ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej.

Przedstawione przez Doktoranta rezultaty badań analitycznych i symulacyjnych w zakresie dotyczącym metodyki prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc są wartościowe i interesujące, a wnioski przedstawione przez Doktoranta z nich wynikające są spójne i logiczne. Mają dużą wartość poznawczą i praktyczną, bowiem opracowana przez Doktoranta metodyka prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na moc elektryczną metodą ważonych współczynników funkcji autokorelacji cząstkowej może stanowić bardzo pomocne narzędzie dla Operatora Systemu Przesyłowego (Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.) w procesie prognozowania krótkoterminowego.

Recenzowana rozprawa wykazuje ponadto bardzo dobrą ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w obszarze nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka oraz umiejętność samodzielnego tworzenia metodyki badań oraz prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska opracowana przez mgra inż. Rafała Czapaja spełnia w pełni warunki stawiane rozprawom doktorskim w art. 187. Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.), jest wybitnie dobra i zasługuje na wyróżnienie.

W związku z tym wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom merytoryczny opracowania, osiągnięte wyniki i możliwości jego praktycznego wykorzystania w procesie prognozowania krótkoterminowego przez Operatora Systemu Przesyłowego stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy.



Waldemar DOŁĘGA