

Dr hab. inż. Grzegorz Dudek, prof. PCz
Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki
Wydział Elektryczny
Politechnika Częstochowska
Al. Armii Krajowej 17
42-200 Częstochowa

Częstochowa, dn. 29 maja 2023 r.

WPŁYNEŁO

dn.....2023 -06- 0 1

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Kopyta

pt. *Prognozowanie obszarowe zapotrzebowania i produkcji energii elektrycznej*

Formalną podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego. Oceny rozprawy doktorskiej dokonano według kryteriów określonych w ustawie z 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Dariusz Baczyński, prof. PW, a promotorem pomocniczym dr inż. Jacek Wasilewski.

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa liczy 199 stron. Składa się z trzynastu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, bibliografii zawierającej 332 pozycje oraz spisu tabel, rysunków i załączników, które zamieszczono na płycie CD.

Teza pracy jest następująca: *Podjęcie hierarchiczno-obszarowe do prognoz przepływów energii elektrycznej umożliwi osiągnięcie porównywalnych wyników do prognoz punktowych, z jednoczesną redukcją kosztów pozyskania i przetwarzania danych oraz zwiększeniem bezpieczeństwa systemu prognoz.*

We wstępie Autor podaje motywację podjęcia tematyki prognozowania obszarowego zapotrzebowania i produkcji energii elektrycznej w kontekście zmian zachodzących w energetyce w ostatnich latach.

W rozdziale drugim podano klasyfikacje prognozowania w energetyce w różnych aspektach: ze względu na zmienną prognozowaną, ze względu na horyzont prognoz, ze względu na rozdzielczość prognoz oraz ze względu na skalę przestrzenną prognoz.

W rozdziale trzecim omówiono metody prognozowania stosowane w elektroenergetyce. Dokonano ich kategoryzacji w różnych ujęciach. Bardziej szczegółowo opisano metody używane w pracy – sieci neuronowe i metody oparte na drzewach decyzyjnych.

Przegląd literatury w zakresie prognozowania obszarowego energii elektrycznej zamieszczono w rozdziale czwartym. Rozdział piąty zawiera cel, tezę i zakres pracy. Rozdział szósty charakteryzuje proponowane rozwiązanie, a rozdział siódmy opisuje dane pozyskane do badań. W rozdziale ósmym zdefiniowano zmienne wejściowe i wyjściowe, zbadano korelacje pomiędzy nimi oraz dobrano metody prognozowania.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono modele prognostyczne dla generacji opomiarowanej i przepływów energii. Opisano metody ich optymalizacji. Podano wyniki prognoz.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono metodykę korekt prognoz przepływów, a w rozdziale jedenastym metodykę rozdziału salda energii superobszaru na obszary. Rozdział dwunasty dotyczy analizy wrażliwości obszarowych metod prognoz przepływów energii elektrycznej. Rozdział trzynasty zawiera podsumowanie i wnioski.

Opinia na temat rozprawy – uwagi krytyczne i polemiczne

Zagadnienie prognozowania w elektroenergetyce ma w dzisiejszych czasach szczególne znaczenie ze względu na szereg nowych wyzwań, które stawia przed nami rozwój sektora energetycznego. Wzrost udziału energii pochodzącej z odnawialnych źródeł (OZE) wymaga dokładnego prognozowania wytwarzania energii w celu optymalnego zarządzania siecią i skutecznego integrowania OZE z istniejącymi systemami elektroenergetycznymi. Koncepcja klastrów energii, które łączą lokalne źródła, magazyny energii i odbiorców w ramach jednego podsystemu wymaga prognoz lokalnej generacji i zapotrzebowania, a także przepływów międzysystemowych. W przyszłości rozwój elektromobilności przyniesie dalsze wyzwania w obszarze prognozowania zapotrzebowania i generacji. Świadomy tych wyzwań Autor podejmuje problem prognozowania produkcji i zapotrzebowania na energię elektryczną w ujęciu obszarowym i hierarchicznym. Opracowane rozwiązania są dedykowane lokalnym obszarom bilansowania. Nie mam wątpliwości, że tematyka rozprawy jest trafna, istotna i aktualna w aspekcie jej walorów poznawczych i użytecznych.

Tytuł rozprawy jest odpowiednio zwarty i komunikatywny. W pełni oddaje najistotniejsze elementy treściowe rozprawy. Celem badań jest opracowanie metodyki obszarowego prognozowania przepływów energii elektrycznej. Cele szczegółowe jakie stawia sobie Autor obejmują: jednoczesne prognozowanie produkcji z OZE i zapotrzebowania na energię elektryczną, prognozowanie w oparciu o zredukowany zakres danych (pozyskiwanych niższym kosztem), zgodność hierarchiczną przepływów na niższych i wyższych poziomach napięcia, wykorzystanie obszarowych zamiast punktowych prognoz pogody, prostą metodykę przy zachowaniu uniwersalności metod oraz odtwarzanie prognoz wewnątrz danego obszaru w oparciu o hierarchiczną strukturę przepływów energii. Teza pracy jest skonstruowana poprawnie. Możliwa jest jej weryfikacja eksperymentalna. Problem badawczy jest jasno sformułowany.

We wstępie Autor przekonująco uzasadnia podjęcie tematu w kontekście zmian zachodzących w energetyce w ostatnich latach. Zmiany te dotyczą gwałtownego rozwoju energetyki odnawialnej, zaostrzenia norm proekologicznych i wzrostu elektromobilności. Autor słusznie dostrzega wyzwania związane z dekompozycją systemu elektroenergetycznego na podsystemy lokalne (klastry energii) i problemy z bilansowaniem energii w takich warunkach. Proponuje metody prognozowania przepływów energii w ujęciu obszarowym i hierarchicznym.

Kolejne trzy rozdziały pracy mają charakter wprowadzający w tematykę. W rozdziale drugim Autor dokonuje klasyfikacji problemów prognostycznych w elektroenergetyce. Wyróżnia i opisuje pięć kategorii podziału: ze względu na zmienną prognozowaną, ze względu na horyzont prognoz, ze względu na rozdzielczość prognoz oraz ze względu na skalę przestrzenną prognoz. Bardzo szczegółowo i wyczerpująco omawia każdą kategorię, przytaczając ogromną ilość źródeł literaturowych.

W rozdziale trzecim omówiono metody prognoz stosowane w elektroenergetyce. W początkowej części rozdziału Autor objaśnia podstawowe pojęcia i dokonuje przeglądu literatury w zakresie podziału metod prognostycznych. Następnie szczegółowo omawia różne kategorie metod prognostycznych, m.in. metody parametryczne i nieparametryczne, fizyczne, statystyczne, inteligencji obliczeniowej, deterministyczne i probabilistyczne, indywidualne, hybrydowe i zespołowe. Analizuje ich wady i zalety, podaje wiele przykładów użycia.

W odrębnych podrozdziałach (3.3 i 3.4) omówiono dwa typy modeli, które stosowane są w części eksperymentalnej pracy: sieci neuronowe i modele wykorzystujące drzewa decyzyjne. Spośród licznych architektur sieci neuronowych wybrano dwie: MLP i LSTM. Ta pierwsza jest chyba najczęściej stosowana w praktyce, a ta druga jest szczególnie przydatna do predykcji szeregów czasowych. Autor szczegółowo omawia budowę obu modeli, problemy ich uczenia i optymalizacji. Wnikliwa analiza problemów zanikających i eksplodujących gradientów w sieciach LSTM, wraz z przedstawieniem skutecznych metod ich rozwiązania, świadczy o zaawansowanej orientacji Autora w obszarze uczenia maszynowego. Podobnie drobiazgowo opisano metody oparte na drzewach decyzyjnych: lasy losowe i drzewa wzmacniane, choć występują tutaj pewne nieścisłości. Na przykład przy opisie problemu zanikających gradientów Autor wspomina tylko o funkcji aktywacji typu tangens hiperboliczny, zapominając o funkcji sigmoidalnej. W innym miejscu wspomina o „metodach eliminacji gradientu”, zamiast o metodach zapobiegania eksplozji gradientów. Węzły drzewa decyzyjnego nazywa błędnie gałęziami, a w opisie drzew wzmacnianych kolejne drzewa generowane przez algorytm nazywa „coraz większymi udoskonaleniami drzew poprzednich”, co stanowi niefortunny skrót myślowy.

Przegląd literatury zawarty w rozdziale czwartym omawia zagadnienia prognozowania obszarowego energii elektrycznej. Autor szczegółowo tłumaczy zasady działania, wady i zalety poszczególnych podejść: metody Previento, metody dystansowej, metod opartych na sieciach neuronowych, modelu opartego na łańcuchu Markowa i metody ważenia lokalnego. W kolejnych podrozdziałach dokonuje przeglądu literatury w zakresie prognozowania przestrzennego generacji ze źródeł wiatrowych i fotowoltaicznych oraz prognozowania obciążeń. Przegląd literatury oceniam jako wyczerpujący i gruntowny. Autor cytuje i omawia dużą liczbę artykułów. W większości są to prace z ostatnich lat.

Rozdział piąty zawiera cel, tezę, motywację i zakres badań. Autor przekonująco motywuje podjęcie tematu kwestiami ekonomicznymi i bezpieczeństwa. Prognozowanie na bazie danych obszarowych jest znacznie tańsze niż na bazie danych punktowych (mniejsze koszty zakupu danych pogodowych), a proponowane holistyczne podejście do prognozowania z wykorzystaniem informacji z różnych poziomów hierarchii systemów lokalnych zwiększa niezawodność prognoz.

Od rozdziału szóstego zaczyna się część merytoryczna pracy. W rozdziale tym przedstawiono proponowane rozwiązanie prognozowania obszarowego. Zobrazowano je czytelnymi rysunkami, chociaż na rys. 6.2 pokazującym schemat blokowy uzgadniania prognoz w trybie top-down popełniono błąd – zamiast symbolu sumatora użyto symbolu mnożenia. W dalszej części Autor poprawnie opisuje kolejne kroki i założenia procedury badawczej. W rozdziale siódmym scharakteryzowano dane wykorzystywane w części eksperymentalnej. Autor nie tylko obrazuje dane (saldo energii) za pomocą histogramów i wykresów skrzypcowych, co pozwala zrozumieć ich naturę, ale także opisuje metodę badania ich wiarygodności. W tabelach zamieszczonych w załącznikach pokazuje statystyki opisujące rozkłady danych.

W rozdziale ósmym zdefiniowano zmienne wejściowe i wyjściowe. Te pierwsze obejmują zmienne kalendarzowe, pogodowe oraz energetyczne (saldo energii i poziomy generacji). Definiując zmienne,

rozważa się różne opóźnienia, od -3 do 3. Tak szeroki wachlarz zmiennych wejściowych umożliwi dokładniejszą predykcję zmiennych energetycznych. W załącznikach podano tabele ze statystykami opisującymi zmienne pogodowe oraz diagramy korelacji pomiędzy zmiennymi. W oparciu o analizę korelacji Autor definiuje kilkadziesiąt zestawów danych wejściowych. Taki podział zmiennych na grupy pozwoli zbadać wpływ zmiennych wejściowych w różnych kombinacjach na wyniki prognoz różnych wielkości wyjściowych.

Rozdział dziewiąty opisuje modele stosowane do prognozowania generacji i przepływów energii. Jako metodę referencyjną Autor wybrał metodę naiwną, natomiast jako modele podstawowe drzewa wzmacniane XGBoost i sieci LSTM. Jest to uzasadniony wybór: drzewa wzmacniane należą do najskuteczniejszych uniwersalnych modeli uczenia maszynowego, a sieci rekurencyjne LSTM są szczególnie przydatne do modelowania danych sekwencyjnych i szeregów czasowych. W początkowej części rozdziału dziewiątego Autor omawia różne mierniki dokładności prognoz, wybierając jako podstawową miarę dokładności w swoich badaniach średni znormalizowany błąd bezwzględny (NMAE). Wielkością normalizującą jest rozstęp szeregu czasowego. Niestety Autor nie podaje definicji tego rozstępu. Czy zależność tej miary błędu od wariancji i trendu szeregu nie zakłóca jej „informatywności”? Taki sam błąd bezwzględny w szeregach o niskiej wariancji lub z niewielkim trendem będzie miał znacznie mniejszą wartość znormalizowaną niż w szeregach o dużej wariancji lub stromym trendzie. Czy błędy NMAE dla różnych szeregów można porównywać? Problem ten wymaga szerszej dyskusji.

Problemem w optymalizacji modeli uczenia maszynowego jest dobór ich hiperparametrów. Autor stosuje metodę przeglądu zupełnego, ustalając wcześniej zbiory wartości poszczególnych dla hiperparametrów. Estymację błędu generalizacji dokonuje się na zbiorach walidacyjnych reprezentujących okresy wcześniejsze w stosunku do testowego, co jest poprawne dla problemów prognostycznych. Na pochwałę zasługuje szczegółowe omówienie przez Autora znaczenia hiperparametrów obu modeli i niuansów treningu modeli. Z opisu na str. 121 wynika, że model LSTM zawiera dwie warstwy ukryte i prawdopodobnie warstwę wyjściową (brak opisu tej warstwy). Odpowiedni rysunek rozwiałby wątpliwości co do jego architektury. Autor definiuje jako hiperparametr funkcje aktywacji w warstwie ukrytej, przyjmując dwa typy tych funkcji: ReLU i tanh. Czy to oznacza, że modyfikuje się standardową komórkę LSTM (rys. 3.7), wprowadzając zamiast funkcji sigmoidalnych inne? Takie zabiegi wydają się nieuzasadnione i mogą mieć nieoczekiwane konsekwencje.

W kolejnych dwóch podrozdziałach (9.2 i 9.3) omówiono wyniki prognoz w rozbiciu na dwa zbiory danych. Autor zestawia wyniki w czytelnej formie, wnikliwie je komentując, i obrazuje prognozy na wykresach. Z przeprowadzonych badań wyciąga poprawne wnioski, m.in.: trudno wskazać jedną metodę uczenia maszynowego, która byłaby najlepsza we wszystkich przypadkach oraz prognozy obszarowe są alternatywne do punktowych pod względem dokładności. Zauważa, że dokładność prognoz silnie zależy od „sterowania” – niestety termin „sterowanie” nie został zdefiniowany. Na str. 124 wspomniano o „warstwie aktywacji sieci LSTM”, której również nie zdefiniowano.

W rozdziale dziesiątym opisano metodykę korekt prognoz przepływów. Opis ten jest miejscami mało zrozumiały i wymaga doprecyzowania. Na przykład jak działa podejście homogeniczne? Jak rozumieć zdanie „Wariant prosty bazował na porównaniu dokładności różnych prognoz na swoim wejściu”? Jak dokładnie działa „przełączanie”? Pojęcia przepływów nadrzędnych i podrzędnych nie zostały zdefiniowane. W wariancie warunkowym rozważano sześć progów dokładności. Jakie wyniki zawierają tabele – dla którego z tych progów? Na czym polega „agresywność pomijania korekt”? Działanie systemu korekt można było zobrazować bardziej czytelnym przykładem. Badania w zakresie korekt

prognoz przepływów są przez Autora skrupulatnie podsumowane (podrozdział 10.4) z ogólną konkluzją, że korekta jest możliwa tylko w niektórych przypadkach, jednak na ogół stopień poprawy wyników jest nieznaczny.

Rozdział jedenasty omawia system rozdziału salda energii superobszaru na obszary w celu odtworzenie prognoz niżej w hierarchii przepływów energii z prognoz przepływów wyżej w hierarchii (superobszaru). Do estymacji prognoz na niższym poziomie wykorzystano metodę prostego skalowania, regresję liniową oraz LSTM. Te dwie ostatnie metody wykorzystują szerszy zakres danych wejściowych (zmiennie pogodowe). Prezentacja wyników w tabelach jest trochę myląca – wyniki dla metod porównawczych powinny być pokazane w odrębnych kolumnach, a nie w kolumnach podpisanych nazwami metod „rozdzielających”. Rozdział jedenasty zakończony jest wnikliwą analizą rezultatów.

W rozdziale dwunastym porównano wyniki modeli prognostycznych (XGBoost i LSTM) i dokonano analizy wrażliwości modeli na hiperparametry oraz zmiennie wejściowe. Autor porównuje wyniki w czytelnej formie wykresów pudełkowych, które dają pogląd na temat wartości średnich i wariancji błędów. Rozbicie błędów na treningowe, walidacyjne i testowe wnosi dodatkowe informacje, pozwalające zdiagnozować proces optymalizacji i uczenia modeli. W wielu przypadkach błędy na zbiorach testowych znacznie odbiegają od błędów na zbiorach treningowych i walidacyjnych (rys. 12.1 i 12.4). Autor słusznie diagnozuje to zjawisko jako efekt zmiany rozkładu danych testowych w stosunku do walidacyjnych (str. 165). Czy zatem, zdaniem Autora, błędy walidacyjne mogą być podstawą do doboru zmiennych wejściowych i hiperparametrów modeli? Czy można inaczej zdefiniować procesy optymalizacji modeli, aby zniwelować problem zmian w rozkładzie danych? Błędy prognoz dla różnych kombinacji zmiennych wejściowych i wartości hiperparametrów zobrazowane są dla każdego zadania prognostycznego. To umożliwia lepsze zrozumienie istotności zmiennych i wartości hiperparametrów oraz identyfikację optymalnych kombinacji zmiennych. Autor dokonuje tego starannie, analizując indywidualnie każdy model i zestaw danych.

W podsumowaniu pracy (rozdz. 13) Autor uzasadnia podjęcie tematu i podkreśla jego wagę w kontekście nowych modeli funkcjonowania systemów elektroenergetycznych. Omawia zakres pracy i wyciąga poprawne wnioski z przeprowadzonych badań. Przedstawia wkład własny oraz wytycza kierunki dalszych badań.

Układ redakcyjny rozprawy nie budzi zastrzeżeń z jedną uwagą, dotyczącą podziału na podrozdziały. W dwóch przypadkach z rozdziału nadrzędnego wywodzi się tylko jeden podrozdział (4.1 i 8.4.1). Podział na te podrozdziały jest zbędny. Praca napisana jest bardzo wnikliwie, co zasługuje na pochwałę. Autor drobiazgowo opisuje problemy badawcze, proponowane rozwiązania i analizuje wyniki, wyciągając poprawne wnioski. Język pracy jest generalnie poprawny z właściwym słownictwem specjalistycznym i odpowiednią ścisłością sformułowań, choć nie jest wolny od błędów, szczególnie stylistycznych. Sekwencja treści prezentowanych w kolejnych rozdziałach jest właściwa: od informacji wstępnych, wprowadzających w tematykę, poprzez opis problemu i danych, opis proponowanego rozwiązania i zakresu badań eksperymentalnych, po przedstawienie i analizę wyników. Źródła literaturowe dobrane są właściwie. Na wyróżnienie zasługuje bardzo szeroki przegląd literatury i orientacja Autora w podjętej tematyce.

Teza rozprawy została udowodniona – Autor w swoich badaniach eksperymentalnych wykazał, że podejście hierarchiczno-obszarowe do prognozowania przepływów energii elektrycznej umożliwia osiągnięcie porównywalnych wyników do podejścia opartego na prognozach punktowych, a przy tym

jest tańsze i zapewnia większy poziom bezpieczeństwa. Nie mam wątpliwości, że Autor rozwiązał postawiony problem i osiągnął założony cel, używając właściwych metod. Oryginalność rozprawy polega na opracowaniu metodyki prognozowania obszarowego przepływów energii w ujęciu hierarchicznym przy użyciu danych o charakterze punktowym i obszarowych. Rozprawa wykorzystuje aktualne osiągnięcia w dziedzinie prognozowania w elektroenergetyce opisane w literaturze światowej. Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników. Na uwagę zasługuje jego wnikliwość i drobiazgowość w analizie wyników badań.

Oceniam wysoko znaczenie uzyskanych wyników dla rozwoju dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika oraz technologie kosmiczne, zwłaszcza w kontekście ich potencjalnych zastosowań w elektroenergetyce, przed którą stoją nowe wyzwania związane z rozwojem systemów lokalnych, OZE i elektromobilności.

Uwagi językowe, edytorskie i redakcyjne

- W pracy występują liczne błędy stylistyczne, np.: „metoda nie wymaga dodatkowych danych wejściowych do posiadania” (str. 33), „Nie jest to więc punkt w rozumieniu przestrzeni, a punkt liczbowy na osi wartości.” (str. 43), „Metody pojedyncze należy traktować jako metody prognoz, niezależne od siebie w przypadku ich klasycznej pracy.” (str. 44), „Nie zajmują one miejsca jako element szeregowego połączenia metod.” (str. 45), „Z metod do praktycznego zastosowania, jak zostały określone metody black-box, wymienione zostały metody regresji” (str. 53), „W ten sposób pojawiają się zagadnienia tego, jaki pobrać optymalny obszar by jednocześnie maksymalizować odpowiedź silnie obciążonego serwera i minimalizować koszt dekompresji silnie skompresowanych danych pobieranych, oraz jak dobrym odwzorowaniem danych jest przyjmowanie najbliższego punktu siatki NWP przy tak dużej rozdzielczości przestrzennej tej siatki.” (str. 82), „Zastosowany sposób przedstawienia umożliwiał jednak prostsze przedstawienie analizowanego zagadnienia.” (str. 86), „Każdy obszar posiada zaś w przykładzie opomiarowane i nieopomiarowane generacje energii elektrycznej oraz nieopomiarowane zapotrzebowanie na tę energię.” (str. 86), „Na rys. 6.2 przedstawiono schemat uzgadniania prognoz według koncepcji top-down, z racji supozycji większej inercji, więc i dokładności operacyjnej prognoz dla superobszaru jak obszaru o dużej skali i wysokim stopniu agregacji danych.” (str. 88), „Stąd też rozważony został scenariusz najbardziej podstawowy, w przypadku sukcesu którego można by przystąpić w przyszłości do implementacji proponowanego rozwiązania na prognozach o dłuższym horyzoncie prognoz.” (str. 90), „W wyniku analiz stwierdzono, że tak jak pierwszego zbioru duże skoki zazwyczaj nie występowały w danych.” (str. 95), „Upewnienie się do poprawności siły relacji określonych korelacją może zachodzić dwojako.” (str. 110), „Może mieć ona mieć np. formę linearyzacji danych - wtedy jednak zmienna powinna pozostać w formie zlinearyzowanej - lub przyjęcia formy i oszacowania równania nieliniowego, a następnie obliczenia współczynnika determinacji w miejsce korelacji Pearsona” (str. 111), „Powyższe zostawiają do praktycznego zastosowania miary MAE i RMSE.” (str. 115), „Pierwszy model stanowiła metoda naiwna która zakładała posiadanie najświeższych możliwych pomiarów w momencie prognozy, a więc realnie patrząc by mieć porównanie godzina do godziny, dane te stanowiły pełną dobę poprzednią względem momentu generacji prognoz. Inaczej mówiąc w metodzie naiwnej wykorzystano jako prognozę dane na temat zmiennej wyjściowej sprzed 48 h względem czasu, na którego dotyczyła prognoza.” (str. 118), „Dla działania systemu przeanalizowano wariant prosty, złożony (zwany dalej warunkowym) oraz wariant homogeniczny” (str. 134), „Potwierdzają to uzyskane wyniki, gdzie w wyniku korekt sald energii z poszczególnych GPZ nie uzyskano poprawy.” (str. 142), „Zmiany wprowadzone w ramach szukania rozwiązań w parametrach standardowych polegały na

braku rozważania 50 neuronów w pierwszej warstwie ukrytej, podniesieniu minimalnej cierpliwości metody do 50 iteracji oraz zwiększeniu maksymalnej liczba iteracji do 1000." (str. 153), „Redukcja ta, odbyłaby się jednak zaburzeniem tworzenia uniwersalnego schematu rozwiązania problemu” (str. 161), „Dla zmiennych poza farmami wiatrowymi i generacją superobszaru można było za wykluczyć z kombinacji te o numerach 5-14 ...” (str. 166), „Wnioski z analizy umożliwiają operacyjnie znaczne przyspieszenie w przyszłości nauki dla analizowanych obiektów, w wyniku dalszego uproszczenia zaproponowanej metody uniwersalnej.” (str. 170)

- Liczebniki w zdaniu powinny być zapisywane słowami a nie cyframi, jeśli wyrażają niewielkie wartości (str. 77, 105, 123, 127).
- Brak znaków interpunkcyjnych: przecinków przed słowem „który”, imiesłowami itp. (str. 15, 60, 77, 83, 90, 111, 118, 123, 126, 133, ...), kropek (str. 18, 161).
- Str. 15: zamiast „ze względu obszerność” powinno być „ze względu na obszerność”.
- Str. 17: zamiast „funkcji Kopyły” powinno być „funkcji kopyły”.
- Str. 19: zamiast „ultraterminowe” powinno być „ultrakrótkoterminowe”.
- Str. 23: w połowie linii niepotrzebne przejście do następnej.
- Str. 51: zamiast „jest niektórych” powinno być „jest przez niektórych”.
- Str. 53: błędne powtórzenie „wykonywanie wykonywania”.
- Str. 56: zamiast „grupuję” powinno być „grupuje”.
- Str. 57: „Uczenie” niepotrzebnie z dużej litery.
- Str. 64: zamiast „oparta jest sumę” powinno być „oparta jest na sumie”; brakujące słowo po „wspomniane”.
- Str. 66: zamiast „z użyciem równania (3.1)” powinno być „z użyciem równania (4.1)”.
- Str. 71: zamiast „różność” (modeli, krzywych), powinno być „różnorodność”.
- Str. 73: zamiast „redukcję” powinno być „redukcji”.
- Str. 73: zamiast „a w przypadku metody PCA wartości do wag przypisane były wartości własne” powinno być „a w przypadku metody PCA do wag przypisane były wartości własne”.
- Str. 73: we wzorze (4.6) występują nieobjaśnione symbole.
- Str. 76: „rozgłaszanych prognoz” – niezrozumiałe.
- Str. 79: zamiast „Zastosowanie sieci grafowych może mieć różne zastosowanie” powinno być „Sieci grafowe mogą mieć różne zastosowanie”.
- Str. 81: w zdaniu „w Polsce na koniec było” brakuje roku kalendarzowego.
- Str. 83: zamiast „umożliwić rozpatrywać” powinno być „umożliwić rozpatrywanie”.
- Str. 89: zamiast „korzystać” powinno być „korzysta z”.
- Str. 93: „liczbę 1 h próbek” – niezrozumiałe.
- Str. 111: zamiast „Może mieć ona mieć” powinno być „Może ona mieć”.
- Str. 112: zamiast „musiałyby” powinno być „musiałyby”.
- Str. 144: „korekt z punktu 8” – nie wiadomo o jaki punkt 8 chodzi.
- Str. 153: zamiast „stronie” powinno być „strojenie”.

Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Kopyta stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy teoretycznej Autora z dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, a także na umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej. Pomimo zamieszczonych powyżej uwag krytycznych moja generalna opinia o pracy jest pozytywna i oceniam ją wysoko.

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymogi ustawy z 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Marcina Kopyta do publicznej obrony pracy doktorskiej i wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

