



dr hab. inż. Tomasz Sikorski
Politechnika Wroclawska
Wydział Elektryczny
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel. (71) 320 21 60, fax. (71) 322 97 25
e-mail: tomasz.sikorski@pwr.edu.pl

WPLYNEŁO
dnia 4.01.21
Jm

Wrocław, 04 stycznia 2021

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie zgodnie z uchwałą Rady z dnia 05.11.2020 r.

Autor: **mgr inż. MATEUSZ DUTKA**

Tytuł: **Prognozowanie generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji**

| Zawartość recenzji: | str. |
|---|------|
| 1. Ogólna charakterystyka rozprawy..... | 1 |
| 2. Elementy oryginalne rozprawy..... | 2 |
| 3. Uwagi i pytania merytoryczne..... | 3 |
| 4. Ocena rozprawy i wnioski końcowe..... | 4 |
| Załącznik: wykaz uwag szczegółowych i usterek redakcyjnych..... | 5 |

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Dutki, napisana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Zbigniewa Hanzelki, przy promotorstwie pomocniczym dr inż. Bogusława Świątka, dotyczy ważnego i aktualnego zagadnienia prognozowania generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii, które nabiera szczególnego znaczenia w koncepcjach inteligentnych sieci elektroenergetycznych. Tematyka rozprawy jest więc aktualna i ważna – zarówno z naukowego, jak i technicznego punktu widzenia.

Recenzowana rozprawa liczy 191 stron i zawiera spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli, a także 7 rozdziałów, precyzujących cel i tezę pracy, a także zawierających analizę literaturową modeli prognostycznych generacji ze źródeł odnawialnych, prezentację badanych obiektów, charakterystykę modeli prognostycznych dedykowanych OZE opartych na sztucznej inteligencji, analizę porównawczą zaproponowanych modeli prognostycznych z modelami stosowanymi przez inne jednostki badawcze, wielopunktową korektę prognozy pogody i jej wykorzystanie w prognozowaniu produkcji energii, a także podsumowanie, wnioski końcowe i bibliografię.

Przedmiotem badań Autora są metody prognozy należące do rodziny metod statystycznych wykorzystujące modele sztucznych sieci neuronowych. Zastosowanie sieci neuronowych w zagadnieniach predykcji zależy od kilku czynników, wśród których wyróżnić można między innymi wybór struktury sieci neuronowej oraz struktury danych wejściowych i uczących, zakres czasowy danych uczących, wybór danych weryfikujących czy wreszcie sama jakość danych. Zaproponowana w rozprawie metoda badawcza oparta jest na iteracyjnych analizach wykorzystujących różne konfiguracje

skd

struktur sieci neuronowych i struktur danych. W tym celu Autor przeprowadził badania oparte na rzeczywistych danych z czterech elektrowni wiatrowych i dwóch elektrowni fotowoltaicznych. Jako wartości kryterialne wykorzystał mierniki dokładności prognoz. Rezultaty zastosowania opracowanych struktury sieci neuronowych zostały następnie porównane z wynikami uzyskanymi dwoma alternatywnymi metodami prognostycznymi stosowanymi przez niezależne jednostki badawcze. Dodatkowym aspektem pracy jest zastosowanie sieci neuronowych do korekcji numerycznych prognoz pogody. Dla osiągnięcia tego celu Autor rozważył wykorzystanie sieci neuronowych przy wykorzystaniu większej liczby punktów siatki prognostycznej oraz danych pochodzących z różnych systemów prognozy pogody.

Układ pracy jest właściwy i w sposób jednoznaczny dotyczy podjętej tematyki. Przedmiot rozprawy oraz postawiony cel jest w pełni uzasadniony. Przedstawiona metoda badawcza pozwala zrealizować cel pracy. Zakres badań jak i osiągnięte rezultaty potwierdzają postawioną tezę. Wydaje się, że z korzyścią dla pracy byłoby jedynie przedstawienie bardziej ogólnego przeglądu metod i modeli prognostycznych oraz metodologii ich oceny.

Na uwagę zasługuje również dobór literatury obejmujący łącznie 106 pozycji. Większość cytowanej literatury to pozycje stosunkowo nowe. Doktorant odniósł się też do pozycji literaturowych mających znaczący wkład w rozwój metod prognostycznych datowanych na lata 70-te oraz 90-te ubiegłego stulecia. Dobór pozycji literatury wskazuje, że Doktorant ma bardzo dobre rozeznanie w tematyce rozprawy.

2. Elementy oryginalne rozprawy

Za najważniejszy dorobek własny i oryginalne osiągnięcia naukowe Autora rozprawy uważam:

1. Syntetyczne opracowanie i przedstawienie złożonych zagadnień dotyczących problematyki prognozowania generacji ze źródeł wiatrowych i fotowoltaicznych.
2. Wybór rzeczywistych obiektów do badań (cztery elektrownie wiatrowe, dwie elektrownie fotowoltaiczne) o odmiennej charakterystyce technicznej, różnych uwarunkowaniach geograficznych i meteorologicznych. Pozyskanie i opracowanie długoterminowych danych rzeczywistych reprezentujących parametry techniczne i meteorologiczne badanych obiektów, a także wykonana autorska analiza zmienności mocy generowanej omawianych obiektów w zależności od zmian energii pierwotnej oraz innych warunków meteorologicznych. Umieszczone w pracy analizy obiektów są oryginalne i stanowią ważny element charakterystyki danych przed ich wykorzystaniem w procesie aplikacji modeli prognostycznych.
3. Wykonanie szeregu symulacji uczących i optymalizacyjnych, czego efektem było zaproponowanie 18 struktur sieci neuronowych poddanych analizie. Zaproponowanie 16 konfiguracji struktur danych wejściowych dla elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych i przeanalizowanie ich pod kątem wpływu zbioru danych wejściowych na dokładność prognoz z użyciem opracowanych struktur sieci neuronowych. Identyfikacja konfiguracji sieci neuronowych oraz struktur danych wejściowych, dla których osiągnięto minimalne błędy prognozy.
4. Szerokie badania weryfikacyjne modeli prognostycznych opartych na sieciach neuronowych poprzez porównanie uzyskanych rezultatów z wynikami dwóch alternatywnych metod: metody rozkładu kanonicznego wektora zmiennych losowych oraz metody adaptacyjnej krzywej mocy. Badania wykonane w oparciu

o rzeczywiste dane długoterminowe w wyniku współpracy w ramach projektu badawczego.

5. Pozyskanie i opracowanie danych prognoz pogody z dwóch różnych systemów numerycznej prognozy pogody. Zaproponowanie autorskiej metody korekty numerycznej prognozy pogody wykorzystującej dedykowaną sieć neuronową.

3. Uwagi i pytania merytoryczne

Przedstawione poniżej uwagi i pytania merytoryczne mają charakter dyskusyjny oraz porządkujący i nie kwestionują zasadniczych wyników rozprawy oraz oryginalnych osiągnięć Autora.

1. W opisie metody badawczej Autor podaje, iż modele przetestowano w oparciu o 6 elektrowni, a obiekty wybierano w taki sposób, by możliwe było zaproponowanie uniwersalnego modelu charakteryzującego się skalowalnością. Następnie Autor podaje główne kryteria wyboru obiektów (liczba i moc jednostkowa turbin/panel, lokalizacja, typy generatorów, wysokość od osi piasty, powierzchnia obrotowa wirnika). Na czym dokładnie polega uniwersalność modelu, czy uniwersalność rozwiązania Autor buduje na możliwości dopasowania struktury sieci neuronowych do różnych struktur zbiorów danych czy na dopasowaniu do parametrów technicznych obiektów.
2. Na początku rozdziału 2 autor przytacza podział modeli prognostycznych. Następnie omawia przykładowe modele prognostyczne dedykowane prognozowaniu generacji z elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych. Rozdział wydaje się być miejscami niespójny. Autor zamiennie stosuje określenia model w stosunku do metod prognostycznych czy systemów prognozowania. W opisie przywoływanych modeli prognostycznych zestawy danych wejściowych, weryfikacyjnych, aktualizujących nie są wystarczająco jasno omówione. Można sformułować ogólną uwagę, iż z korzyścią dla pracy byłoby szersze omówienie ogólnych zasad budowania modeli prognostycznych, zwłaszcza pod kątem znaczenia danych uczących, weryfikacyjnych i aktualizujących, a także metodologii oceny jakości prognoz.
3. W prezentacji wyników umieszczonych w rozdziale 4 odnoszących się do badań struktur sieci neuronowych i struktur danych brakuje pewnych informacji o sposobie przeprowadzenia analiz. Czy wybór optymalnej struktury sieci i struktury danych jest wynikiem analizy krzyżowej 18 struktur sieci neuronowych i 16 struktur danych pod względem najmniejszego błędu MAE/MAPE? Jaki był zakres czasowy danych uczących, czy zawsze jeden rok? Czy sieć uczono taką samą strukturą danych, co danych wejściowych użytych do weryfikacji, czy może sieć uczono strukturą o najszerzym wektorze danych wejściowych lub miksem struktur danych? Prosiłbym o informacje uzupełniające czy zgodnie z tezą pracy rozważano tylko prognozy krótkoterminowe jednodniowe/kilkudniowe czy może podjęto również próbę identyfikacji ograniczenia maksymalnej długości horyzontu prognozy w zaproponowanych modelach prognostycznych opartych na sieciach neuronowych.
4. W podsumowaniu wyników prognoz produkcji energii dla badanych struktur sieci neuronowych i możliwych struktur danych brakuje szerszego komentarza odnoszącego się do charakterystyki pracy obiektów. Interesującym byłoby nie tylko porównanie wpływu struktur sieci i danych na błędy prognozy, ale również wychwycenie wpływu na błąd prognozy uwarunkowań pracy obiektów, jak np. wpływ liczby jednocześnie pracujących turbin lub zmienność prędkości i kierunku wiatru. Sugerują to również wyniki porównania badanych modeli z alternatywnymi

metodami prognozowania. Opracowana przez Autora metoda daje dobre rezultaty, ale jak wskazuje sam Autor dla niektórych miesięcy błąd MAE/MAPE jest wyższy niż dla metody adaptacyjnej krzywej mocy. Rodzi się pytanie jakie uwarunkowania mogły to spowodować? Czy jest to udział błędnych danych czy ich zmienności? Czy w nawiązaniu do tezy pracy zidentyfikowano udział błędów powyżej 20% mocy zainstalowanej, a może takie błędy nie występowały, albo występowały jedynie w skrajnych uwarunkowaniach np. przy błędnych danych wejściowych? Należałoby w przyszłości bardziej precyzyjnie zidentyfikować wrażliwość metody na błędy w danych oraz zakres zmienności, które potencjalnie mogłyby spowodować, że założony w tezie pracy poziom średniego błędu prognozy 20% mocy zainstalowanej nie będzie możliwy do osiągnięcia. Tego typu analizy pozwoliłyby również rozważyć odpowiednie metody aktualizacyjne.

5. W przedstawionych w rozdziale 6 wynikach wpływu zastosowania sieci neuronowych do korekcji błędu prognozy pogody zabrakło kilku doprecyzowujących informacji dotyczących wykorzystanych systemów numerycznej prognozy pogody, między innymi na jakich metodach predykcyjnych są one oparte oraz jakimi błędami prognozy się charakteryzują. Podanie tych informacji pozwoliłoby lepiej zinterpretować stosunkowo nieznaczny wpływ na błędy MAE/MAPE uzyskany poprzez uwzględnienie w strukturze danych wejściowych kolejnych punktów siatki prognostycznej tego samego systemu, a znaczący wpływ na zmniejszenie tego błędu w przypadku rozszerzenia danych o punkty prognostyczne z drugiego systemu prognozowania pogody.

4. Ocena rozprawy i wniosek końcowy

Przechodząc do ogólnej oceny rozprawy stwierdzam, że **postawiony cel oraz zakres pracy zostały przez Doktoranta osiągnięty**. Sposób rozwiązania problemów postawionych w rozprawie wskazuje na bardzo dobre opanowanie i zrozumienie zagadnienia. Doktorant wykazał się dużą wiedzą, nie tylko teoretyczną, ale również praktyczną, czego potwierdzeniem jest nie tylko zakres badań przedstawionych w rozprawie, ale również udział w projektach badawczo-rozwojowych. Uważam, że opiniowana rozprawa stanowi **oryginalne podejście do aktualnego i ważnego problemu prognozowania generacji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych**.

Stwierdzam, że rozprawa opracowana przez mgr inż. Mateusza Dutkę **spełnia wymagania** stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) oraz wymagania Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z dnia 30 września 2016 r., poz. 1586). **Stawiam wniosek o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów postępowania przewidzianych w przewodzie doktorskim w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika.**

Jednocześnie biorąc pod uwagę poziom merytoryczny opracowania, zakres wykonanych badań i osiągnięte wyniki stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy.

Pomorz Sidor

Załącznik: wykaz uwag szczegółowych i usterek redakcyjnych

Jak na rozmiar rozprawy, łącznie 191 stron, oraz zakres omawianych zagadnień, zauważyłem w pracy pewną liczbę nieścisłości i usterek redakcyjnych. Z całym przekonaniem stwierdzam, iż nie wpływają one moją na ogólną ocenę rozprawy. Dla porządku poniżej zestawiam niektóre z zauważonych usterek redakcyjnych i komentarzy do tekstu, które nasuwają się przy czytaniu rozprawy, mając nadzieję, iż będą one przyczynkiem do rozwoju dalszych prac badawczych Autora. **Na zamieszczone poniżej uwagi i komentarze redakcyjne nie oczekuję odpowiedzi.**

1. Streszczenie, str. 4, jest "W rprawy zbadano...", winno być „W pracy”.
2. Wprowadzenie, str. 14, zestawienie generacji z farmy wiatrowej i fotowoltaicznej położonych w odrębnych miejscach geograficznych nie jest wystarczające do sformułowania wniosku o komplementarności tego rodzaju źródeł odnawialnych tylko ze względu na tożsamość technologii.
3. Wprowadzenie str. 15, rynek bilansowy , powinno być rynek bilansujący.
4. Rozdział 2.1, str. 21, pewien niedosyt budzi praktyka stosowania cytowań w sposób blokowy, bez głębszej prezentacji analizy poszczególnych pozycji. Należy unikać stwierdzeń typu: „Świadczyć o tym mogą pojawiające się bardzo liczne artykuły w znaczących oficynach wydawniczych IEEE Transaction, Springer oraz Elsevier [16–31].”
5. Rozdział 2.2, tytuł podrozdziału sugerowałby kluczową dla rozprawy dyskusję dotyczącą wyboru struktur danych wejściowych do model prognostycznych, tymczasem przedstawiono w nim pokrótce charakterystykę rozdzielczości prognoz pogody. Tytuł rozdziału jest mylący.
6. Rozdział 2.3, str. 26, brak rozwinięcia skrótu modelu FUGS w wykazie oznaczeń.
7. Rozdział 2.3, str. 27, rys. 2.4, brak legendy oznaczeń zmiennych na rysunku, brak odniesienia w tekście opisu do zmiennych modelu przedstawionych na rysunku.
8. Rozdział 2.3.3., str. 29, wzór 2.1 – brak legendy dla zmiennej granicy szeregu „M”, brak interpretacji podanych we wzorze zmiennych w kontekście zdania wprowadzającego wskazującego na wykorzystanie w prognozowaniu energii w elektrowniach wiatrowych.
9. Rozdział 2.3.3, str. 31 – nawiązanie do parametrów które nie są zaprezentowane (szerokość funkcji gaussowskiej, współczynnik jądra wielomianowego, wartość parametru regularyzacji), odniesienie zalet sieci SVM do sieci MLP, których cech nie przedstawiono.
10. Rozdział 2.4.2, str. 34 - brak rozwinięcia skrótu GPV w wykazie oznaczeń.
11. Rozdział 3, str. 41, rys. 3.3 - błędne oznaczenia obiektów na osi OY, FW5, FW6 powinno być PV1, PV2.
12. Rozdział 3, str. 41, rys. 3.3 - pomocne byłoby zestawienie danych dostępnych dla poszczególnych obiektów.
13. Rozdział 3.2, str. 72, tabela 3.7 - brak przedziałów wartości współczynnika korelacji z interpretacją siły korelacji (brak związku, słaba, umiarkowana, silna, bardzo silna).
14. Rozdział 3.2.1., str 73, rysunek 3.41 - warstwa wejściowa oznaczona jako V, czy nie powinno być T (temperatura), chyba że intencją była prezentacja ujednoczonego podejście zastosowanego później w analizie zależności pomiędzy innymi czynnikami atmosferycznymi a mocą generowaną, wtedy komentarz do oznaczenia V, brakuje również komentarza o rozmiarach wektora wejściowego.

15. Rozdział 3.2.2, str. 77 - „Przedstawione wyniki nie potwierdzają znaczącego wpływu ciśnienia...”, chyba poprawniej „Przedstawione wyniki potwierdzają brak znaczącego wpływu ciśnienia ...”.
16. Rozdział 3.3 - nie zachowano ujednoliconego oznaczenia natężenia promieniowania słonecznego: str. 81 $G[W/m^2]$, elektrownia PV1 – rys. 3.55-3.58 $Sr[W/m^2]$, elektrownia PV2 – tabela 3.10 $Irr[W/m^2]$.
17. Rozdział 4, wstęp, str. 107, akapit drugi – wydaje się, że zamiast przecinka powinien być łącznik – „kombinacja modelu statystycznego i/ oraz modelu bazującego na danych numerycznych prognozy pogody”.
18. Rozdział 4.1.1, rys. 4.2, wzór 4.1 – brak unifikacji indeksów oznaczeń, i-te wejście, i-ta waga, nie r-ta waga, k-ta wartość wyjściowa rzeczywista, i dalej, rysunek 4.3 i wzór 4.3, indeksacja sumy szeregu: i-te wejścia jak na rysunku 4.3 do n, k-ty obraz uczący do N.
19. Rozdział 4.2.1, str.112-113 – definicje mierników jakości predykcji, zmienne, czym różni się zmienna T od n_p ? Czym różni się błąd MAE od q_p ?
20. Rozdział 4.3.3, str. 118, „Przykładowe dane zaprezentowano w tabeli 4.1:” – powinno być „4.1.” nie „:”.
21. Rozdział 4.4., tabela 4.2., - legenda tabeli: „liczba neuronów wejściowych N zależna od liczby strumieni danych wejściowych”, nieprecyzyjne określenie, co znaczy liczba strumieni danych wejściowych?
22. Rozdział 4.4.1.1, str. 122 - „Prognozy generowano dla zbioru danych wejściowych oraz struktury sieci zgodnie z Tabela 4.3 oraz 4.5 dla elektrowni FW1” – czy nie powinno być 4.2 (struktury sieci) (analogicznie dalej w rozdziale dla innych obiektów).
23. Rozdział 4.4.1.1, str. 122, rys. 4.7, w podpisie rysunku należałoby podać informacja o strukturze sieci neuronowej i strukturze danych, dla których błąd MAE/MAPE był najmniejszy (struktura sieci 7, struktura danych 14) – (analogicznie dalej w rozdziale dla innych obiektów).
24. Rozdział 4.5, tabela 4.6, str. 137 - czy dla kolumny FW2, wiersz MAPE nie powinna być struktura sieci 4?
25. Rozdział 5.1.2 - nie jest jasne czy prezentowane wyniki błędów w okresie 24h są średnią godzinową z podanych dni 25.08-31.08.2013. Jeśli tak, brakuje komentarza o uwarunkowaniach pogodowych w tym czasie, czy były stałe czy zróżnicowane. W porównaniu do analogicznego rozdziału 5.2.2 dla FW2 wyniki podawane są dla wybranej doby 26.08.2013.
26. Rozdział 5.3. - oznaczenie skrótu metody sieci neuronowych na rysunkach, w tabelach, w tekście – zastosowano SNN, powinno być ANN (patrz wykaz oznaczeń) lub ewentualnie SSN.
27. Rozdział 5.3.1., rys 5.17, str. 152 - w podpisie rysunku należałoby podać informację o strukturze sieci neuronowej i strukturze danych, dla których wykonywano porównania z innymi metodami (struktura sieci 7, struktura danych 1) – dalej analogicznie dla porównań wykonanych dla obiektów FW2, FW3.
28. Rozdział 5.3.1, rys 5.20, str. 154 - czy oznaczenie osi OY nie powinno być q_t błąd bezwzględny prognozy – dalej analogicznie dla porównań wykonanych dla obiektów FW2, FW3.
29. Rozdział 5.3.1, rys 5.23, str. 156 - czy oznaczenie osi OX nie powinno być MAE, a może $|g_t|$ – dalej analogicznie dla porównań wykonanych dla obiektów FW2, FW3.

30. Rozdział 5.3.1, rys. 5.29, str. 159 - sformułowany wniosek dystrybuanta po lewej stronie pozostałych nie jest do końca precyzyjny – porównując z rysunkiem 5.25 w listopadzie MAE dla opracowanej metody jest większy niż dla AKM.
31. Rozdział 6.1.2, tabela 6.3, str. 172 - czy oznaczenia „x” w tabeli nie powinny być wstawione inaczej, tabela sugeruje, że dla prędkości wiatru struktura danych 1 zawiera dane z prognozowane prędkości wiatru z dwóch NWP i 6 punktów, a z tekstu wynika odwrotnie – struktura 1 oznacza jeden punkt prognozowany z jednego systemu NWP.
32. Rozdział 6.1.2, rys. 6.3 i 6.4, str. 171 i 172 - w podpisie rysunku powinno się doprecyzować informacje, że prezentowany błąd MAE/MAPE dotyczy prognozy prędkości wiatru, a także informację o numerze struktury sieci neuronowej, dla której prezentowane są wyniki (chyba, że są to wartości uśrednione względem struktur sieci).
33. Rozdział 6.2, str. 174, struktura sieci 19 zgodnie z tabelą 6.1 to 3 warstwy ukryte i 40 neuronów, nie jak podano 45, natomiast struktura sieci 30 to 4 warstwy ukryte i 45 neuronów, nie jak podano 40.