

**Dr hab. inż. Andrzej Wędzik**

Łódź, dnia 29 grudnia 2020 r.

Dyscyplina naukowa: Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

Politechnika Łódzka

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki

Instytut Elektroenergetyki

ul. Stefanowskiego 18/22

90-924 Łódź

Email: andrzej.wedzik@p.lodz.pl

## **RECENZJA**

**Rozprawy doktorskiej mgra inż. Mateusza Dutki**

**pt. „Prognozowanie generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji”**

### **1. Podstawa formalna recenzji**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Mateusza Dutki, pt. „**Prognozowanie generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji**”, realizowana w **dyscyplinie elektrotechnika**.

Promotorem rozprawy jest **prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka**.

Promotorem pomocniczym jest **dr inż. Bogusław Świątek**.

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. uczelni, z dnia 10 listopada 2020 r., wystosowane na podstawie uchwały w/w Rady z dnia 5 listopada 2020 r.

### **2. Struktura rozprawy i wykorzystanie źródeł bibliograficznych**

Rozprawa składa się ze **191** (stu dziewięćdziesięciu jeden) stron i została podzielona na **6** (sześć) rozdziałów.

W **Rozdziale 1** autor przedstawił motywacje, jakimi kierował się przy wyborze tematyki swojej rozprawy. Określił również cele pracy, sformułował tezę oraz zaproponował metodykę badawczą, pozwalającą na jej udowodnienie.

W **Rozdziale 2** doktorant przedstawił aktualny stan wiedzy, dotyczącej problematyki prognozowania produkcji energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych i fotowoltaicznych. Zaprezentował i opisał znane grupy modeli prognostycznych, opartych o wykorzystanie dużych zbiorów danych statystycznych. Opisy skoncentrowane zostały na modelach i metodach dedykowanych dla elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych.

W **Rozdziale 3** zaprezentowane zostały podstawy teoretyczne, opisujące zjawiska wykorzystywane w energetyce wiatrowej i fotowoltaice. Zaprezentowane zostały rzeczywiste obiekty energetyczne, wykorzystane w analizie porównawczej. Opisane zostały dane 5 obiektów rzeczywistych, usytuowanych na terenie Polski oraz jednego położonego na terenie Grecji.

**Rozdział 4** poświęcony został opisowi metod i modeli prognostycznych, opartych o sztuczną inteligencję. Na podstawie wykonanych analiz porównawczych opracowanych modeli, doktorant zaproponował do dalszej analizy te z nich, które generowały najlepsze prognozy.

W **Rozdziale 5** przeprowadzona została analiza porównawcza modelu prognostycznego, opracowanego przez doktoranta z 2 (dwoma) modelami opracowanymi przez inne, niezależne jednostki. W celu dokonania porównań zaproponowane zostały kryteria weryfikacji poprawności działania analizowanych modeli prognostycznych.

W **Rozdziale 6** doktorant zaproponował metodę poprawy jakości prognoz generowanych przez opracowany model poprzez wykorzystanie wielopunktowej korekty prognozy. Podał również analizie wyniki prognoz generowanych przez zmodyfikowane w ten sposób modele.

W **Podsumowaniu** doktorant zamieścił opis wykonanych przez siebie prac oraz innych, oryginalnych osiągnięć. Opisał również aplikację, zbudowaną na bazie opracowanego modelu, której jest współautorem.

Rozprawę kończy **Bibliografia**, w skład której wchodzi 106 (sto sześć) pozycji. Każda z wymienionych pozycji została zacytowana w treści rozprawy.

### **3. Ważność sformułowanego zagadnienia naukowego**

Od wielu lat polska energetyka działa w strukturach gospodarki rynkowej. Uruchomione zostały i działają już wszystkie mechanizmy Rynku Energii Elektrycznej. W strukturach tych od lat działa energetyka wykorzystująca odnawialne źródła energii (OZE). Sukcesywnie, z roku na rok, zwiększa się również udział OZE w ogólnym bilansie produkcji energii elektrycznej. Jednak ze względu na swój charakter, źródła wykorzystujące OZE cechują się zazwyczaj bardzo dużą

niestabilnością produkcji energii elektrycznej. Wiąże się to ze znacznym uzależnieniem tej produkcji od czynników pogodowych, lokalizacji itp. Stopniowe zwiększanie w systemie elektroenergetycznym udziału energetyki opartej o wykorzystanie OZE, powoduje problemy związane z ciągłością i stabilnością wytwarzania energii elektrycznej. Rosnąca generacja z OZE stanowi również duże wyzwanie, zarówno dla Operatorów w zakresie bieżącego bilansowania mocy, jak i dla spółek handlowych, kupujących i rozliczających energię elektryczną wytworzoną z OZE. Dlatego też, niezmiernie istotnym problemem staje się prognozowanie i przewidywanie poziomu produkcji energii elektrycznej generowanej przez energetykę opartą o wykorzystanie OZE. Powyższe fakty sprawiają, że istnieje obecnie potrzeba opracowywania metod i modeli prognostycznych, które umożliwią, w sposób wiarygodny, prognozowanie pracy w Krajowym Systemie Energetycznym jednostek wytwórczych, opartych o OZE.

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Dutki bardzo dobrze wpisuje się w nurt poszukiwań nowych metod prognostycznych oraz opracowania nowoczesnych narzędzi służących do coraz dokładniejszego przewidywania produkcji energii elektrycznej ze źródeł wykorzystujących OZE. Rozprawa cechuje się dużymi walorami poznawczymi i przydatnością do praktycznego wykorzystania.

**Zdaniem recenzenta zagadnienie naukowe zostało sformułowane poprawnie i może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej.**

#### **4. Cel i teza rozprawy**

Głównym celem pracy jest opracowanie i zbadanie metod prognostycznych generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji.

Autor rozprawy sformułował 1 (jedną) tezę (str. 16 rozprawy):

***„Możliwe jest zbudowanie systemu pozwalającego na skuteczne prognozowanie generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji z perspektywą czasu 24h, dla średniego błędu prognozy nie przekraczającego 20% mocy zainstalowanej oraz prostej i uniwersalnej strukturze umożliwiającej szybkie prognozowanie dla dużej liczby elektrowni, wspierającego techniczne zarządzanie energią na potrzeby zapewnienia ciągłości dostaw energii elektrycznej.”***

Teza została sformułowana prawidłowo.

Dodatkowo, doktorant wytyczył sobie również cele i zadania szczegółowe, które pomogły mu w sposób jednoznaczny udowodnić postawioną tezę (str. 16-17 rozprawy):

- *„Analiza pracy elektrowni wykorzystujących OZE w celu zbadania czynników wpływających na ilość produkowanej energii. Na przykładzie 4 elektrowni wiatrowych oraz dwóch fotowoltaicznych zaproponowano po 16 struktur danych wejściowych do modelu, a następnie zweryfikowano ich wpływ na zmianę dokładności wykonanych prognoz.*
- *Opracowanie i przetestowanie modeli pozwalających na predykcję generacji energii elektrycznej elektrowni wykorzystujących promieniowanie słoneczne oraz wiatr. W wyniku przeprowadzonych badań, zaproponowano i przetestowano po 18 różnych struktur sieci neuronowych, w celu wyboru najkorzystniejszego wariantu.*
- *Zaproponowanie modeli charakteryzujących się prostą budową, krótkim procesem uczenia i adaptacji. Wybrane modele przetestowano na rzeczywistych zarejestrowanych danych pochodzących z obiektów zlokalizowanych w kraju oraz poza nim, zróżnicowanych pod względem lokalizacyjnym oraz technicznym.*
- *Porównanie zaproponowanych w pracy modeli z alternatywnymi modelami rozwijanymi przez dwie zewnętrzne jednostki badawcze takie jak Politechnika Częstochowska oraz PSE Innowacje.*
- *Zaproponowanie sposobów korekty i poprawy numerycznych prognoz pogody na potrzeby prognozowania produkcji energii. Na podstawie przeprowadzonych testów zaproponowano oraz zweryfikowano modele sieci neuronowych różniące się pod względem struktury oraz zbioru danych wejściowych. W przeprowadzonej analizie wykorzystano dane pochodzące z różnych portali pogodowych.”*

## **5. Oryginalność rozwiązania zagadnienia naukowego**

Oryginalność rozprawy doktorskiej mgra inż. Mateusza Dutki polega przede wszystkim na:

- Przygotowaniu i opracowaniu reprezentatywnego zbioru danych (pogodowych, technicznych i lokalizacyjnych) pozwalających na zaprojektowanie i zbudowanie modeli prognostycznych wykorzystujących sieci neuronowe, weryfikację tych modeli oraz analizę możliwości uproszczenia budowy podobnych modeli w przyszłości dla nowych instalacji, wykorzystujących OZE do produkcji energii elektrycznej.

- Wykonaniu szeregu analiz pozwalających dokładniej określić wpływ czynników pogodowych na produkcję energii elektrycznej przez źródła wykorzystujące OZE.
- Opracowaniu metody właściwego doboru struktury danych wejściowych dla modeli prognostycznych oraz struktury sieci neuronowej dedykowanej do prognozowania produkcji energii elektrycznej ze źródeł wykorzystujących OZE.
- Krytycznej analizie i porównaniu zaproponowanych przez doktoranta modeli z innymi modelami, rozwijanymi przez zewnętrzne jednostki badawcze.
- Zaproponowaniu skutecznej metody korekty numerycznych prognoz pogody bazującej na wykorzystaniu danych wynikających z uwarunkowań technicznych lub lokalizacyjnych.

Należy również podkreślić praktyczne aspekty wykorzystania opracowanej metodyki, przejawiające się w:

- Współdziałanie autora rozprawy we wdrożeniu aplikacji prognostycznej dedykowanej dla firm działających na rynku energii.

## **6. Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**

Sformułowana w rozprawie teza oraz wynikające z niej cele szczegółowe i zadania badawcze wymagały od doktoranta znacznego pogłębienia oraz powiązania ze sobą wiedzy z wielu dziedzin, np. elektroenergetyki, ekonomii, informatyki czy matematyki. Pomimo rozległego obszaru problematyki badawczej doktorant wykazał się znacznymi umiejętnościami w rozwiązywaniu postawionych przed nim zadań. Można zatem stwierdzić, że autor rozprawy potrafił zdefiniować problem badawczy, opracować odpowiednią metodykę rozwiązania tego problemu, przeprowadzić narzucone przez siebie badania symulacyjne, z wykorzystaniem technik komputerowych oraz dokonać właściwej analizy, interpretacji i podsumowania uzyskanych wyników badań. Wynika z tego jednoznacznie, że doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

## **7. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy**

W rozprawie nie dostrzegam zasadniczych wad. Nieliczne uwagi ogólne mają charakter dyskusyjny. Stanowią one próbę spojrzenia na treść rozprawy, głównie z punktu widzenia

oczekiwań potencjalnych użytkowników, uczestników Rynku Energii Elektrycznej. Można do nich zaliczyć przede wszystkim:

- I. Na str. 44 i 45 doktorant powołuje się na dane warunków wietrzności na terenie Polski, które zostały opracowane przez prof. Halinę Lorenc z IMGW na podstawie pomiarów wykonanych w latach 1971-2000. Z prywatnych kontaktów z inwestorami wynika jednoznacznie, że dane te są mało wiarygodne, ze względu na pomiary na stosunkowo niskich wysokościach nad gruntem. Obecnie podjęcie decyzji o wybudowaniu nowej instalacji wiatrowej poprzedzone jest najczęściej badaniami lokalnymi, wykonanymi na terenie potencjalnej inwestycji, a same pomiary wykonywane są na wysokościach zbliżonych do wysokości stosowanych turbin. Jak zdaniem doktoranta niedoskonałości pomiaru czy prognozy wietrzności „na niskich wysokościach” wpływają na opracowaną metodę prognozowania i co należy zrobić, aby zminimalizować błędy wynikające z mało wiarygodnych danych?
- II. Na Rysunku 3.58 (i innych) cyklicznie pojawiają się wartości błędów równe 0 (zero). Czym autor tłumaczy takie wartości dla przebiegów błędów prognozy?
- III. Na Rysunku 5.17 charakterystyka mocy elektrowni wiatrowej, wynikająca z pomiarów (niebieskie punkty), w okolicach prędkości wiatru na poziomie 12 m/s wyraźne rozdziela się na dwa poziome obszary (linie). W jaki sposób wyznaczona została charakterystyka mocy elektrowni wiatrowej w opracowanym modelu prognostycznym (czerwone punkty)? Czemu przebiega ona bliżej górnych punktów pomiarowych? W jaki sposób tak określona charakterystyka modelu wpływa na dokładność prognozy?
- IV. Na Rysunku 5.32 występują bardzo duże wartości błędów w miesiącach styczni i grudzień. Jak autor może wytłumaczyć taką sytuację i co ma na to główny wpływ? Czy możliwe jest skorygowanie tych błędów do mniejszych wartości w opracowanym modelu?

Obok powyższych uwag wnoszę również o ustosunkowanie się doktoranta, w trakcie obrony publicznej, do 2 (dwóch) problemów o charakterze ogólnym, które wymagają szerszego omówienia i wyjaśnienia:

- V. W rozprawie brakuje dokładnego opisu metodyki przyjętej przy porównywaniu dokładności i skuteczności prognoz generowanych przez opracowany model. Doktorant w swojej rozprawie odwołuje się do mechanizmów rynkowych, głównie

obowiązujących na rynku bilansującym. Wszyscy uczestnicy tego rynku zainteresowani są dużą trafnością prognozy, gdyż każde odchylenie od złożonej oferty skutkuje wymiernymi i często wysokimi kosztami. Prognozę generuje się w dniu n-1, przed złożeniem ostatecznych ofert godzinowych na rynku bilansującym. Weryfikacja tych ofert, a więc również sprawdzenie trafności prognozy, dokonywane jest w każdej godzinie dnia następnego. Właśnie takiej oceny brakuje w rozprawie. Co prawda w Rozdziale 5 na Rysunkach 5.21 czy 5.28 zamieszczono prognozy godzinowe, ale dotyczą one mocy osiągananej przez elektrownie, a nie błędów prognozy opracowanej dzień wcześniej (w dniu n-1). Dla uczestnika rynku bilansującego bardziej wartościowe są np. zestawienia błędów godzinowych, jakie doktorant zamieścił dla porównywanych metod prognostycznych (MRK i AKM) niż zestawienia dniowe, tygodniowe czy miesięczne, które dominują w analizach przeprowadzanych dla metody opracowanej przez doktoranta. Przy takiej prezentacji wyników potencjalny użytkownik opracowanej metody, nie może w sposób jednoznaczny ocenić jej przydatności do działań rynkowych.

VI. Doktorant przetestował w rozprawie kilkadziesiąt struktur sieci neuronowych tworzących model prognostyczny. Przy takiej liczbie możliwych wariantów zawsze pojawia się kłopot wyboru tego najlepszego. Proszę o ustosunkowanie się do tego problemu i publiczną odpowiedź na pytania, które mogą być również interesujące z punktu widzenia potencjalnego użytkownika opracowanej metody:

- Czy dla każdego źródła OZE będzie wybierana inna struktura sieci neuronowej?
- Kto decyduje o ostatecznym wyborze modelu i tym samym struktury sieci neuronowej. Robi to autor programu czy może jego użytkownik?
- Czy opisane i analizowane w rozprawie błędy (MAE i MAPE) są jedynym i najlepszym sposobem dokonania wyboru struktury sieci neuronowej?
- Czy możliwe jest zastosowanie metod, procedur optymalizacji, czy przynajmniej automatyzacji, wyboru najlepszej struktury sieci neuronowej do danego źródła OZE?

Autor nie ustrzegł się również pewnej ilości mniej istotnych błędów, głównie edytorskich, do których można zaliczyć:

- a. Brak pełnego rozwinięcia zastosowanej po raz pierwszy nazwy skróconej danego określenia. Dotyczy to np. takich nazw jak: OZE (str. 3) czy NWP (str. 4) oraz innych.
- b. Brak konsekwencji w zastosowaniu pisma pochyłego (kursywy) do nazw lub cytatów obcojęzycznych, wymienianych w tekście. Np. w „Wykazie ważniejszych oznaczeń i symboli” kursywa jest stosowana, a w dalszych rozdziałach rozprawy jest ona stosowana „wybiórczo”.
- c. Na str. 15 użyto określenia „... rynku bilansowym”. Powinno być „... rynku bilansującym”.
- d. Na str. 29, w opisie Równania 2.1, jest „– wektor danych wejściowych dla  $i$ . danej uczącej”. Powinno być „– wektor danych wejściowych dla  $i$ -tej danej uczącej”. W ostatniej linii symbol „ $x$ ” powinien być zapisany jako zmienna „ $x$ ” (kursywą).
- e. Na str. 40, w punktach 5 i 6, użyto jednostki [kW] do opisu mocy zainstalowanej paneli fotowoltaicznych. Wydaje się, że powinna być użyta jednostka [kWp].
- f. Na str. 70 i 71, pod opisami Rysunków 3.38, 3.39 i 3.40 pojawia się oznaczenie elektrowni FW1 pomimo, że rysunki i opisy powinny dotyczyć elektrowni FW4.
- g. W Równaniach 3.9 i 3.10 brakuje opisu niektórych wielkości:  $I_{ph}$  i  $I_0$  w Równaniu 3.9 oraz  $P_{PF}$  w Równaniu 3.10.
- h. Na str. 90 opis Rysunków 3.62-3.67 dotyczy „... wartości temperatury i wilgotności dla elektrowni fotowoltaicznej PV1”. Natomiast dalej doktorant pisze, że „Rzeczywiste pomiary były średnio mniejsze o około 1 [m/s], co może być spowodowane umieszczeniem wiatromierza na wysokości około 3 metrów od poziomemu gruntu”. Zdanie to sugeruje pomiar wiatru, a nie temperatury i wilgotności.
- i. Na str. 92, ponownie użyto jednostki [kW] do opisu mocy elektrowni fotowoltaicznej. Wydaje się, że powinna być użyta jednostka [kWp].
- j. W Równaniu 4.2 i opisie występujących w nim wielkości jest niekonsekwencja w oznaczeniu indeksu zmiennej  $x_i(k)$  (w równaniu) i  $x_r(k)$  (w opisie).
- k. W Równaniu 4.5 brakuje wielokropka pomiędzy elementami  $r_{N1}$  i  $r_{12}$ .
- l. W opisie pod Rysunkiem 4.5 użyto słowa „Metodologia”. Powinno być „Metodyka”. Metodologia jest „nauką o metodach badań naukowych stosowanych w danej dziedzinie wiedzy” (*Słownik języka polskiego PWN*).



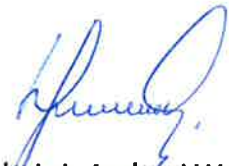
- m. Na Rysunku 4.6 brakuje jednoznacznego opisu (oznaczenia) krzywych.
- n. W opisie wielkości występujących w Równaniu 5.2 opisana jest zmienna  $\overline{X}_x$ , która nie występuje w równaniu.
- o. W Równaniu 5.3 i tekście nad tym równaniem występuje niekonsekwencja w oznaczeniu współczynników:  $a_{ij}$  (w tekście) i  $k_{ij}$  (w równaniu i opisie).
- p. W Równaniu 5.4 brak opisu współczynników:  $a_{kl}$ ,  $a_{ks}$  i  $a_{ls}$ .
- q. Rysunki ilustrujące porównania prognoz elektrowni wiatrowych (np. Rysunki 5.19, 5.20 itd.) są mało czytelne i trudno z nich w sposób jednoznaczny wyciągać wiążące wnioski.

Przedstawione uwagi krytyczne, zarówno o charakterze ogólnym, jak i szczegółowe, mają charakter wyłącznie polemiczny i nie podważają ogólnej pozytywnej oceny rozprawy, a tym bardziej nie zmniejszają wartości opracowanego warsztatu badawczego.

## 8. Podsumowanie recenzji i wnioski końcowe

Przedstawiona rozprawa doktorska Pana mgra inż. Mateusza Dutki stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, polegającego na opracowaniu nowej metody prognostycznej z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, wykorzystujących sieci neuronowe. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, których wynikiem jest opracowanie nowoczesnego narzędzi służącego do coraz dokładniejszego przewidywania produkcji energii elektrycznej ze źródeł wykorzystujących OZE. Rozprawa cechuje się dużymi walorami poznawczymi. Dużą zaletą opracowanej metody jest jej przydatność do praktycznego zastosowania. Doktorant wykazał się dużą biegłością w wykorzystaniu i posługiwaniu się metodami analizy i symulacji komputerowej. Praca została skomponowana poprawnie, a zamieszczone w niej materiały źródłowe zostały wykorzystane przez autora w sposób właściwy. Otrzymane w rozprawie wyniki pokazują, że została one wykonana w obszarze dyscypliny elektrotechnika, a Autor posiada podstawową i rozszerzoną wiedzę w zakresie tej dyscypliny. Postawione w rozprawie cele zostały osiągnięte, a teza udowodniona. Należy dodać, że przedstawione w poprzednim punkcie uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają pozytywnej oceny opiniowanej rozprawy doktorskiej. Na podstawie przedstawionej powyżej oceny rozprawy doktorskiej mgra inż. Mateusza Dutki pt. „Prognozowanie generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii przy

wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji" stwierdzam, że opiniowana praca na podstawie artykułu 179 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. „Przepisy wprowadzające ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. z 2018 r., poz.1669 z późniejszymi zmianami) spełnia wymogi określone w artykule 13, ust. 1, ustawy z dnia 14 marca 2003 r. „o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. z 2016 r., poz. 882, z późniejszymi zmianami) i **wniosuję o dopuszczenie Pana mgra inż. Mateusza Dutki do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**



Dr hab. inż. Andrzej Wędzik