

R E C E N Z J A
rozprawy doktorskiej
gen. dyw. mgr. inż. Dariusza Łukowskiego
pt. Analiza możliwości adaptacji w Siłach Zbrojnych metod optymalizacji
zużycia energii cywilnej infrastruktury lotniczej z zastosowaniem modelu
regresyjnego

(recenzja wykonana na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechniki Poznańskiej
na podstawie uchwały z dnia 23.11.2021r.)

1. Zakres tematyczny rozprawy oraz ocena celowości podjęcia tematu

Zabezpieczenie portów lotniczych a w szczególności baz wojskowych w energię jest fundamentalne z punktu widzenia ciągłości działań tych jednostek i wykonywanych przez nie zadań. W przypadku obiektów wojskowych istotna jest jak największa niezależność od dostawców zewnętrznych, co ma pierwszorzędne znaczenie z punktu widzenia obronności. Dywersyfikacja źródeł energii wydaje się tutaj koniecznością. Specyfika obiektów wojskowych oraz odmienność zadań w stosunku do lotnisk cywilnych nie pozwalają w sposób jednoznaczny odwzorować rozwiązań stosowanych w portach pasażerskich. Kluczowe staje się pytanie, które ze źródeł energii mogą być zastosowane w bazach wojskowych. Kolejnym ważnym zagadnieniem (poza dywersyfikacją) jest optymalizacja wykorzystania energii. Problem ten dawno już zauważyło lotnictwo cywilne. Siły zbrojne poszczególnych krajów również nie dysponują nieograniczonymi zasobami finansowymi, które mogą być przeznaczone na zakup/wytworzenie energii. Oznacza to, że aspekt ekonomiczny dotyczy również baz wojskowych. Nie bez znaczenia jest również czynnik związany z ochroną środowiska. Ponadto zasadne jest pytanie, czy wypracowane przez lotnictwo cywilne metody i rozwiązania w zakresie pozyskiwania i wykorzystania energii dają się łatwo adoptować na grunt wojskowy. W świetle powyższego podjęcie tematu monitorowania, modelowania i optymalizacji zużycia energii w Siłach Zbrojnych jest ze wszech miar uzasadnione. Opisane wyżej zagadnienia stanowią zakres tematyczny przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej. Konieczne jest naukowe podejście do modelowania wykorzystania energii. Autor dysertacji zdecydował się w tym celu na wykorzystanie metod sztucznej inteligencji.

2. Ocena formalna rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa liczy 151 stron. Należy ją zatem zaliczyć do rozpraw dość obszernych w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Praca składa się z pięciu merytorycznych rozdziałów, wstępu, załącznika zawierającego zagregowane dane analizowane w pracy, załącznika z kodem programu MATLAB realizującego sieci neuronowe oraz bibliografii. Pracę opatrzone streszczeniem w języku polskim oraz angielskim.

Bibliografia zawiera dziewięćdziesiąt pozycji. W żadnej spośród nich autorem nie jest Doktorant. Wśród nich są między innymi książki, aktualne artykuły naukowe, normy, regulaminy oraz instrukcje. W rozprawie zdecydowano cytować źródła w przypisach dolnych, na stronie ich występowania, niezależnie od zamieszczenia ich w bibliografii. Układ taki jest wygodny dla czytelnika, gdyż nie zmusza każdorazowo do przeszukiwania spisu umieszczonego na końcu pracy.

Zdecydowaną większość pracy stanowią rozważania ogólne i teoretyczne opisane w rozdziałach od 1 do 4. Praktyczna część zawarta jest w rozdziałach 4 oraz 5, które łącznie liczą 25 spośród 150 stron. Budzi to pewien niedosyt, gdyż najważniejsza w opinii recenzenta treść stanowi około 17% zawartości rozprawy. Pewne zastrzeżenia budzi również jakość (rozmiar) zamieszczonych rysunków. Na wydruku papierowym większość z nich jest mało czytelna i w trakcie lektury należy wspomagać się wersją elektroniczną pracy.

Treść rozprawy podporządkowana jest realizacji postawionego celu. Rozprawę czyta się z przyjemnością z uwagi na ładny, literacki język oraz klarowne prowadzenie rozumowania przez jej Autora. Nieliczne błędy zostały opisane w dalszej części recenzji.

3. Zwartość pracy, ocena merytoryczna oraz mocne strony pracy

Wstęp do pracy należy uznać za pierwszy rozdział merytoryczny z uwagi na jego objętość (szesnaście stron) oraz przede wszystkim jego treść. Znajdujemy tu bowiem zarówno przekonujące uzasadnienie podjęcia tematu, jak również tezę oraz cel pracy. Obszerne przedstawienie problemu naukowego zawiera opis sytuacji energetycznej krajów Unii Europejskiej (w tym Polski), specyfiki baz wojskowych oraz rozważania dotyczące ich bezpieczeństwa energetycznego. Zawarto również rozważania dotyczące możliwych oszczędności w zakresie wykorzystania energii, definiując przy tym efektywność energetyczną oraz wymieniając czynniki warunkujące tę efektywność. Należy podkreślić, że zarówno teza pracy, jak i jej cel tylko z pozoru mogą brzmieć trywialnie. Wykazanie pozornie prostej tezy o możliwości implementacji rozwiązań wypracowanych dla cywilnych portów lotniczych w bazach wojskowych jest w opinii recenzenta zagadnieniem ambitnym. Dlatego bardzo cenne jest wskazanie możliwych kierunków rozwoju rozwiązań energetycznych oraz narzędzi, które pozwolą modelować, symulować oraz przewidywać zużycie energii przez Siły Zbrojne.

W bardzo obszernym rozdziale pierwszym (liczącym siedemdziesiąt jeden stron) skupiono się na rozwiązaniach energetycznych w cywilnych portach lotniczych. Początkowe rozważania rozdziału stanowią ogólną charakterystykę takich portów, przedstawioną głównie z punktu widzenia zużycia energii elektrycznej. Dalej przedstawiono metody poprawy efektywności energetycznej oraz opis alternatywnych źródeł energii. W odniesieniu do wykorzystania energii słonecznej wskazano miejsca możliwej lokalizacji ogniw fotowoltaicznych w obrębie lotniska, prowadzono rozważania dotyczące efektu lśnienia, sposobów montażu paneli oraz nasłonecznienia terenu Polski. Pokazano jak wyznacza

się sprawność ogniów oraz charakterystyki prądowo napięciowe. Dość obszernie omówiono wykorzystanie energii wiatrowej. W kolejnych podrozdziałach prezentowane są kolejne sposoby alternatywnego pozyskiwania energii, takie jak energia wodna, energia geotermalna, wykorzystanie biomasy oraz ogniów wodorowych. W ostatniej części rozdziału pierwszego skupiono się na omówieniu mikrosieci w portach lotniczych. Całość rozdziału pierwszego zawiera bardzo wiele ciekawych informacji, przydatnych na etapie zastosowań omawianych rozwiązań. Niestety czytając ten rozdział odnosi się wrażenie, że wiele z tych informacji podano bez istotnego powodu. Większość z nich nie znalazło zastosowania w praktycznej części rozprawy. Jako przykład można tu podać wzory określające optyczną masę atmosfery, sprawność ogniów oraz współczynnik mocy C_p (wzór 1.4.11).

W rozdziale drugim (liczącym dwanaście stron) znajduje się charakterystyka wojskowych baz lotniczych z punktu widzenia wykorzystania energii. Wskazano w sposób wyczerpujący podobieństwa i różnice w stosunku do portów cywilnych. Autor omawia również aktualną sytuację baz wojskowych na terenie Polski ze szczególnym uwzględnieniem aktualnego stanu technicznego oraz systemu zarządzania obszarem energetycznym. Bazując na charakterystyce portów cywilnych oraz na specyfice baz wojskowych Doktorant prowadzi szczegółowe rozważania na temat możliwości implementacji rozwiązań cywilnych w wojsku. W opinii recenzenta ta część rozdziału drugiego pokazuje dużą wnikliwość Doktoranta i dużą wiedzę na ten temat.

Rozdziału trzeci (liczący jedenaście stron) poświęcony jest modelowaniu zużycia energii w portach lotniczych. Pierwsza część rozdziału zawiera opis identyfikacji profilu energetycznego. Z punktu widzenia praktycznej części rozprawy najistotniejsza jest druga część tego rozdziału, w której znajduje się prezentacja metod modelowania i prognozowania zużycia energii. W szczególności nieco szerzej omówione są sieci neuronowe, jako wybrane narzędzie analiz. Poza ogólną charakterystyką architektury sieci wspomniano o metodach uczenia sieci oraz błędach uzyskiwanych wyników.

Rozdział czwarty (liczący dwadzieścia jeden stron) stanowi praktyczną część pracy. Znajdziemy tu opis poszczególnych etapów budowy sieci neuronowej, którą jest w tym przypadku trójwarstwowa sieć z sigmoidalną funkcją aktywacji pojedynczych neuronów. Zastosowano w odniesieniu do niej uczenie nadzorowane (tzw. uczenie z nauczycielem). Zmienną predykcyjną (objaśnianą) jest zużycie energii. Opisano pozostałe zmienne (objaśniające) mające wpływ na to zużycie. Zamieszczono szeregi czasowe zestawiające zużycie energii z wybranymi zmiennymi. Parametry sieci (wagi) uzyskano z wykorzystaniem czterech algorytmów uczenia w środowisku MATLAB dla 5, 10 oraz 15 neuronów warstwy ukrytej. Przedstawione są wykresy korelacyjne (wartość rzeczywista i wartość przewidywana) we wszystkich omawianych przypadkach, wykresy błędów w kolejnych iteracjach procesu uczenia oraz wykresy szeregów czasowych rzeczywistych i prognozowanych wartości zużycia energii. Końcowa część rozdziału zawiera wnioski z uzyskanych wyników.

W rozdziale piątym (liczącym cztery strony) zamieszczono rozważania dotyczące możliwości zastosowania wyników uzyskanych we wcześniejszych rozdziałach pracy w Siłach Zbrojnych.

Jak wspomniano wcześniej podjęty temat badawczy jest ważny, przede wszystkim z praktycznego punktu widzenia. Autor rozprawy operuje poprawnym językiem, jasno formułując myśli oraz konsekwentnie prowadzi tok rozumowania. Najważniejsze atuty pracy wymieniono niżej.

- Oryginalne rozwiązanie problemu badawczego, polegającego na określeniu kierunków rozwoju sieci energetycznych w baza lotniczych.
- Pionierskie podejście do zagadnień optymalizacji zasilania energetycznego baz lotniczych.
- Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do modelowania zapotrzebowania na energię.

- Zbiorcze zestawienie źródeł pochodzenia i technologii wytwarzania energii z przeznaczeniem dla wojskowej infrastruktury lotniczej.
- Zaproponowanie zmiennych wpływających na zużycie energii.
- Duża aktualność problemów poruszanych w pracy oraz możliwość praktycznego jej wykorzystania.
- Materiał zawarty w rozprawie może przyczynić się do opracowania Systemu Zarządzania Energią w Siłach Zbrojnych.

4. Uwagi krytyczne

Pomimo niewątpliwych zalet przedstawionej do recenzji rozprawy, można w odniesieniu do niej sformułować uwagi krytyczne.

Niżej wymieniono zauważone niedoskonałości pracy, które **nie wpływają na jej ocenę**.

- Według Słownika Języka Polskiego (PWN) oraz Słownika Wyrazów Obcych „dezyderat” oznacza żądanie, życzenie lub postulat (niekiedy stosowane w odniesieniu do aktów prawnych). Z nieznanymi powodami w rozprawie doktorskiej (dysertacji) nazywana jest przez Autora dezydertem.
- Zamiast „statystyczne” jest „statyczne”. (strona 17)
- Nieliczne błędy edytorskie (np. złamana linia na stronie 22, spacje przed przecinkami).
- Większość rysunków jest mało czytelna. Dysponując jedynie wersją elektroniczną pracy możliwe jest ich pełne odczytanie w znacznym powiększeniu.
- Na rysunku 18 nie zaznaczono kątów α_s , Θ_z .
- Strona 105: zamiast „z częstotliwością dwóch minut na dobę” powinno być „z częstotliwością dwóch minut w przeciągu doby”.
- Należy zgodzić się z pierwszą częścią zdania: „Algorytm uczenia nadzorowanego jest prostszy od samouczącego i częściej stosowany w praktyce”. Co do częstości stosowania to jest mało prawdopodobne aby znane były takie dane. (strona 109)
- Powinno się mówić raczej o wartościach rzeczywistych i prognozowanych a nie o parametrach. (strona 111)
- W drugim zdaniu tekstu „Wyraźnie zaznaczona jest korelacja zmian prędkości wiatru oraz zużycia energii z poprzedniego wykresu” należało potwierdzić . Nieco słabiej zarysowana jest zależność od wiatru” chodziło zapewne o temperaturę. (strona 115)
- Sformułowanie „W oparciu o dane rzeczywiste pomierzone w przeszłości (szeregi danych czasowych), zostały wykonane kroki w przyszłość” jest kolokwialne.
- Powinno być „zapotrzebowania na energię” zamiast „zapotrzebowania ma energię”. (strona 138)

Recenzent zauważył w pracy pewne niedoskonałości, które **wymagają komentarza Autora**. Wymieniono je niżej.

- Autor błędnie i zamiennie używa w pracy określeń: współczynnik korelacji, współczynnik regresji, wskaźnik regresji. Niestandardyzowany współczynnik regresji (wskaźnik regresji) to nic

innego, jak tylko współczynnik kierunkowy prostej regresji. Z treści pracy wynika, że wykorzystywane są dwie wielkości: współczynnik korelacji liniowej r oraz współczynnik determinacji R^2 . Pierwszy z nich, unormowany do przedziału $[-1, 1]$, mierzy siłę i kierunek korelacji liniowej. Drugi, unormowany do przedziału $[0, 1]$ jest miarą dopasowania modelu do danych empirycznych. Dla modelu liniowego z jedną zmienną objaśniającą współczynnik determinacji jest kwadratem współczynnika korelacji. W tym świetle sformułowanie: „Zwykle mieści się on w przedziale od 0 do 1” ze strony 37, odnoszące się do współczynnika korelacji jest niefortunne.

- Nie jest jasna intencja sformułowania ze strony 41; „Analizie porównawczej należy poddać aktualne zużycie energii z prognozą wykonaną np. metodą regresji. (...) Ujemna różnica między aktualnym zużyciem a predykcją wskazuje na uzyskane oszczędności.” Dla regresji danych rzeczywistych i prognozowanych otrzymuje się dodatnie i ujemne różnice o sumie zero.
- 200 stóp to prawie 61 metrów a nie 18,5m. (strona 60)
- Nie można stwierdzić kierunku zależności dla czynników klimatycznych podanych na stronie 106. Czy przed podanymi wartościami są minusy czy myślniki? Zastanawiający jest fakt takiego samego znaku dla wszystkich podanych wartości współczynnika korelacji.
- Jak rozumieć sformułowanie (według jakiego kryterium) „technika sieci neuronowych daje około 2-3-krotnie lepsze rezultaty niż prosta metoda statystyczna”? (strona 109)
- Na stronie 111 wspomniano, że błędy MAE oraz RMSE „można przedstawić również w formie procentowej”, nie wyjaśniając do czego należy odnieść wartości tych błędów.
- W sformułowaniu „Płaszczyzna charakterystyki błędów ma kształt zależny od tego, czy model sieci neuronowej jest liniowy, czy też nieliniowy” (strona 111) powinno mówić się raczej o powierzchni. Akapit ten zawiera duże uproszczenie i odnosi się do przypadku optymalizacji w przestrzeni dwóch parametrów. W ogólnym przypadku mówimy o hiperpowierzchni $n - 1$ wymiarowej w przestrzeni n wymiarowej.
- Wymieniając kroki budowy i wykorzystania sieci pominięto etap jej uczenia. (strona 114)
- Komentarza wymagają przyjęte na poziomie jeden cztery wartości zużycia energii oraz liczby pasażerów w roku 2019. (załącznik 1)
- Nie podano parametrów wykorzystywanej sigmoidalnej funkcji aktywacji (wzór).
- Na rysunkach 45, 46 i 47 pokazano szeregi czasowe dla czterech zmiennych objaśniających. Dlaczego wybrano akurat te zmienne pomijając pozostałe?
- Dobór zmiennych do modelu ma fundamentalne znaczenie z punktu widzenia jakości prognoz wyznaczanych w oparciu o ten model. Dlatego pokazanie prostych zależności na rysunkach 45, 46 i 47 wydaje się niewystarczające. Mimo, że wielowarstwowy perceptron z sigmoidalną funkcją aktywacji ma zdolność do odwzorowywania wzorców również nieliniowych, zasadne było wykorzystanie jednej z metod doboru zmiennych do modelu, bazującej na zależnościach liniowych, chociażby po to aby uniknąć efektu autokorelacji zmiennych. Poglębionych rozważań na temat doboru zmiennych niestety zabrakło w rozprawie.
- Sformułowanie: „określającego jakość przetwarzania dla wszystkich zbiorów wykorzystanych w badaniu” jest niejasne lub nieprecyzyjne. (strona 117)
- Sformułowanie „coraz bliżej linii 45°” jest niepoprawne matematycznie. (strona 119)

- Wykresy na rysunkach od 52 do 55 są błędnie opisane. Nie przedstawiają bowiem błędów regresji a jedynie wykresy rozrzutu w układzie wartości zaobserwowane, wartości prognozowane (odpowiedzi sieci).
- Określając jakość sieci neuronowej należy obserwować wyniki dla zbioru testowego, który nie bierze udziału w procesie uczenia. Dlatego wnioski wynikające z rysunków od 52 do 55 powinny wynikać z analizy tego właśnie błędu a nie błędu dla wszystkich obserwacji. W tym świetle algorytm BFG dla sieci z 15 neuronami warstwy ukrytej dał lepszy wynik niż algorytm BR. Uwaga ta dotyczy również tabeli 1 na stronie 132, gdzie należało zamieścić wyniki dla zbioru testowego.
- Nie wyjaśniono w pracy, które obserwacje znalazły się w zbiorach: uczącym, walidacyjnym i testowym. Na stronie 117 stwierdzono, że podział na te zbiory nastąpił losowo. Wszystkich obserwacji jest 84, natomiast na rysunkach od 59 do 61 pokazano około 60 wartości. Które to są miesiące? Czy zbiór uczący zawierał 60 początkowych obserwacji, które widoczne są na tych rysunkach?
- W świetle powyższej uwagi nie jest jasne czy rysunki od 62 do 64 przedstawiają prognozy, czy też prognozy wygasłe do chwili 84.
- Na jakiej podstawie sformułowano wnioski w odniesieniu do rysunków od 62 do 64, że najlepsze prognozy (w opisie rysunków linia czerwona) uzyskano dla sieci uczonej z wykorzystaniem algorytmu BR?

Recenzent prosi również Autora pracy do ustosunkowania się do niżej wymienionego pytania, które nasuwają się podczas lektury pracy.

- Uzyskana sieć neuronowa została wykorzystana do wyznaczenia prognoz. Jak można ją wykorzystać do poprawy efektywności energetycznej?

5. Podsumowanie oraz wnioski końcowe

Mimo pewnych niedoskonałościach rozprawy należy stwierdzić, że analizowany temat badawczy jest niesłychanie aktualny a sama rozprawa wnosi oryginalne rozwiązanie problemu. Doktorant wykazał się umiejętnościami wymaganymi w trakcie samodzielnej pracy badawczej, dysponując przy tym niezbędną wiedzą teoretyczną.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska gen. dyw. mgr. inż. Dariusza Łukowskiego pt. „Analiza możliwości adaptacji w Siłach Zbrojnych metod optymalizacji zużycia energii cywilnej infrastruktury lotniczej z zastosowaniem modelu regresyjnego” **spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668, późn. zm.) w dyscyplinie Inżynieria środowiska, Górnictwo i Energetyka i wnoszę o przyjęcie rozprawy oraz dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**

Artur Maciąg