

Kraków, 10.01.2022 r.

Dr hab. inż. Paweł Ocoń, prof. PK
Katedra Energetyki,
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
Politechnika Krakowska

Recenzja pracy doktorskiej

Analiza możliwości adaptacji w Siłach Zbrojnych metod optymalizacji zużycia energii cywilnej infrastruktury lotniczej z zastosowaniem modelu regresyjnego

autorstwa gen. dyw. mgr inż. Dariusz Łukowski

Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska liczy 5 rozdziałów, streszczenie, dwa załączniki, spis bibliografii, łącznie 151 stron. Rozprawa została napisana w języku polskim. Doktorant zdefiniował następujące cele pracy:

- *„przeprowadzenie badań: zależności zużycia energii w portach lotniczych od czynników zewnętrznych oraz realizowanych zgodnie z przeznaczeniem zadań, zaproponowanie sposobu poprawy efektywności energetycznej tego typu instalacji, narzędzi organizacyjnych oraz technicznych wykorzystywanych w procesie optymalizacji oraz zbudowanie modelu do analizy i predykcji zużycia energii wykorzystując macierze danych możliwe do uzyskania z opomiarowania obiektów i urządzeń odbiorcy,”*
- *„ocena możliwości wykorzystania procesów ukierunkowanych na poprawę efektywności energetycznej stosowanych w cywilnych portach lotniczych, w tym alternatywnych źródeł energii, w celu maksymalnego uniezależnienia zdolności do wykonania krytycznych działań w warunkach częściowego lub całkowitego odcięcia od sieci dystrybucyjnej.”*

Postawiono następującą tezę pracy:

„Rozwiązania budujące efektywność energetyczną wykorzystywane w cywilnych portach lotniczych można zastosować w bazach lotniczych SZ RP. Aproksymacja danych dostępnych na poziomie bazy lotniczej przy użyciu perceptronu wielowarstwowego umożliwi właściwą

gospodarkę energetyczną i/ oraz budowę inteligentnego opomiarowania. Stanowi to podstawę do minimalizacji potrzeb zasilania zewnętrznego i zwiększa odporność oraz autonomię energetyczną bazy.”

W rozdziale 1 przedstawiono obecny stan cywilnych portów lotniczych w Polsce. Przeanalizowano jakie są główne źródła energii dla portów lotniczych czyli: energia elektryczna i paliwa takie jak gaz naturalny, benzyna lotnicza, olej napędowy, czy propan. Największe jest jednak zapotrzebowanie na energię elektryczną. Pokazano rozkład zużycia tej energii na poszczególne składowe (najwięcej energii pochłaniają terminale a na nich systemy HVAC), jakie czynniki wpływają na to zużycie oraz zaproponowano metody poprawy efektywności energetycznej dla portów lotniczych w Polsce.

W pierwszym aspekcie należy zredukować zapotrzebowanie na energię (stosując niskoenergetyczne urządzenia w tym szczególnie do systemów HVAC i oświetlenia oraz odpowiednią organizację pracy lotniska zapewniającą optymalne zużycie energii). Kolejny aspekt to odpowiednia konstrukcja systemu zarządzania i nadzoru (odpowiedni model zarządzania energią, planowanie energetyczne, dobrze przeprowadzony audyt). Po dokonaniu tych dwóch działań można dopiero zaproponować zastosowanie odnawialnych źródeł energii. W kolejnych podrozdziałach pokazano możliwości zastosowania każdego rodzaju alternatywnych źródeł energii w portach lotniczych.

W rozdziale 2 skupiono się na wojskowych bazach lotniczych. Bazy te mają odmienną strukturę organizacyjną i przeznaczenie w stosunku do cywilnych portów lotniczych. Dokonano porównania pomiędzy portem lotniczym wojskowym a cywilnym w zakresie potrzeb energetycznych i sposobów optymalizacji i zarządzania energią. Przeanalizowano także które działania zaproponowane dla cywilnych portów można wykorzystać w portach wojskowych.

W rozdziale 3 zaproponowano stworzenie modelu budowy profilu energetycznego w porcie lotniczym. Rozpoznanie profilu energetycznego lotniska jest kluczem do zaprojektowania systemu zasilania, odpowiedniego dla przyjętej strategii poprawy efektywności energetycznej i jest to najważniejszy element w systemie zarządzania, realizowany na etapie planowania. Stworzono schemat budowy profilu energetycznego i rozbito na poszczególne etapy:

- 1 etap – gromadzenie i porządkowanie danych
- 2 etap – analiza wzorców energetycznych
- 3 etap – profil energetyczny portu lotniczego

W celu odpowiedniego zaplanowania zużycia energii w dalszych latach niezbędne jest prognozowanie zużycia energii. W podrozdziale 3.2 zaproponowano różne metody prognozowania zużycia energii lub zapotrzebowania na moc:

- metody kalkulacyjne (inżynierskie, statystyczne, sztucznej inteligencji, hybrydowe)
- metody oparte na pomiarach (wykorzystujące dokumenty rozliczeń za energię, wykorzystujące dane z opomiarowania systemów energetycznych)

Szerzej skupiono się na metodach sztucznej inteligencji opartej **na sieciach neuronowych**. Uwagę skoncentrowano na modelu matematycznym neuronów typu Perceptron. W modelu tym wykorzystano neuronową architekturę jednokierunkowej sieci wielowarstwowej.

Szczegółowy opis zaproponowanego modelu przedstawiono w **rozdziale 4**. Do predykcji zużycia energii wykorzystano oprogramowanie MATLAB (dokładnie MATLAB Neural Network Toolbox). W tym celu wykorzystano dane ze strony portu lotniczego San Francisco z lat 2013-2019 i przedstawiono zależności zużycia energii od ilości obsłużonych pasażerów oraz od ilości lotów a także charakterystykę zmian wiatru i temperatury w czasie. Dane te wykorzystano jako dane wejściowe do modelowania predykcji z wykorzystaniem historycznych danych zużycia energii. W badaniach wykorzystano metodę uczenia nadzorowanego, w której parametry sieci są dobierane na podstawie porównania wartości na wyjściu sieci z zadanymi wartościami dla zarejestrowanego, rzeczywistego zużycia energii w porcie lotniczym. Badano wariant sieci z jedną warstwą ukrytą dla różnej liczby neuronów. Założono możliwość występowania 5, 10 i 15 neuronów w warstwie ukrytej. Do realizacji zadania przyjęto cztery algorytmy uczenia, w tym trzy drugiego rzędu.

W **podrozdziale 4.2**. przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań. Pokazano wyniki obliczeń perceptronu wielowarstwowego jednokierunkowego z różnymi algorytmami uczenia oraz różnymi liczbami neuronów w warstwie ukrytej. Przedstawiono również porównawcze zestawienie błędów regresji uzyskane w badaniach dla poszczególnych zbiorów danych. Na końcu porównano dopasowania wyniku symulowanego i zmierzonego oraz błędu średniokwadratowego dla badania z wykorzystaniem sieci wielowarstwowej jednokierunkowej z 5-cioma, 10 –cioma oraz 15-toma neuronami. Na podstawie przedstawionych wykresów i analiz potwierdza przewagę algorytmu BR (Bayesian-Regularization) nad pozostałymi. Charakterystyka uzyskana przy zastosowaniu algorytmu Levenberga-Marquarta w tym przypadku wykazuje największą różnicę i jest wynikiem największego błędu walidacji w przypadku sieci z 10-cioma i 15-toma neuronami w warstwie ukrytej. Widać wyraźnie, że

najlepszy wynik uzyskano przy zastosowaniu algorytmu BR, a najbardziej optymalny wynik, w tym przypadku uzyskano przy sieci z 5-ciomą neuronami w warstwie ukrytej.

Drugim pod względem jakości uzyskanych wyników okazał się algorytm BFGS Quasi-Newton, którego wyniki ulegały poprawie wraz ze wzrostem liczby neuronów w warstwie ukrytej. Algorytmy LM i RBP wykazały się największą niestabilnością uzyskiwanych wyników.

W ostatnim **rozdziale 5** przedstawiono możliwość adaptacji zaproponowanych rozwiązań w Siłach Zbrojnych. Uzyskane wnioski z analiz oraz wyniki badania wskazały na potrzebę opracowania i implementacji następujących możliwych do zastosowania rozwiązań organizacyjno-technicznych zabezpieczających zasilanie infrastruktury w bazach lotniczych. Zaproponowano modernizację struktury baz lotniczych w której powinien pojawić się personel techniczny z odpowiednim przygotowaniem energetycznym. A do predykcji zapotrzebowania na energię zaproponowano wykorzystanie modelu ze sztuczną siecią neuronową.

Załączniki do pracy stanowią: Tabela zagregowanych danych dla portu lotniczego San Francisco oraz Linia komend MATLAB wykorzystana w badaniach sieci neuronowej. Spis literatury obejmuje 90 pozycji.

Uwagi edytorskie

1. Rysunek nr 3 jest niewyraźny trudno odczytać prezentowane na nim dane
2. Na stronie 15 brak numeracji równania:

$$EE_b = \frac{Z}{E_b}$$

3. Brakuje spisu symboli, np. jaką jednostkę przyjmuje symbol E_b (energia zużyta przez bazę lotniczą w czasie t), P_{MPP} (moc maksymalna);

Uwagi szczegółowe

1. W pracy brakuje omówienia algorytmów BFGS Quasi-Newton, Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization oraz RBP odporny algorytm propagacji wstecznej. Jakie są różnice między nimi?
2. W pracy zostało wyszczególnione, że:

„Program w sposób losowy dokonał podziału danych na trzy zbiory:

70% zbiór treningowy;

15% zbiór używany do walidacji sieci pod względem zdolności do generalizacji i zatrzymania procesu uczenia przed wystąpieniem zjawiska przeuczenia;

15% zbiór testowy służący do przeprowadzenia niezależnego testu zdolności sieci do generalizacji.”

Czy testowano inne procentowe podziały zbiorów, i dlaczego zastosowano takie proporcje? Jaki mają one wpływ na uczenie sieci neuronowej?

3. Czy zwiększenie liczby neuronów do 20 poprawiłoby dokładność predykcji zużycia energii?
4. Jaki obecnie wygląda zarządzanie energią na lotniskach wojskowych i jaka metodyka predykcji zużycia energii opracowana w niniejszej pracy doktorskiej będzie miała wpływ na obniżenie zużycia energii?
5. Czy planowane jest wdrożenie zaproponowanej metodyki predykcji zużycia energii na lotniskach w Polsce?

Wnioski końcowe

Pracę doktorską oceniam wysoko, uważam że drobne uwagi edytorskie nie umniejszają w żadnym stopniu wartości naukowej rozprawy. Praca doktorska została napisana starannie, doktorant w sposób rzetelny przedstawił cel, zakres i tezę pracy, jak również metodologię badań.

Celem niniejszej rozprawy była analiza, w jaki sposób zużycie energii na lotniskach cywilnych może być zoptymalizowane i wdrożone w bazach wojskowych sił powietrznych. W niniejszym opracowaniu dogłębnie przeanalizowane zostały trzy filary: redukcja zapotrzebowania, zarządzanie energią, odnawialne źródła energii. Uzupełnieniem analiz jest opis innych zaawansowanych technologii, takich jak mikrosieci wykorzystujące oprogramowanie do zarządzania energią.

Najważniejsze osiągnięcia doktoranta w ramach przedstawionej rozprawy doktorskiej to:

- Opracowanie modelu predykcji zapotrzebowania na energię elektryczną dla portów lotniczych. Na podstawie danych dotyczących zużycia energii na lotnisku w San

Francisco oraz parametrów operacyjnych i meteorologicznych zidentyfikowano model energetyczny.

- Dokonanie walidacji zdolności predykcyjnych Sztucznej Sieci Neuronowej przy użyciu aplikacji Neural Networks Toolbox z MATLAB, oraz wybranie najlepszego algorytmu predykcji (algorytm Bayesian-Regularization) dla analizowanych danych

Zaproponowane modele predykcji zapotrzebowania na energię elektryczną dla portów lotniczych mogą zostać zastosowane w praktyce przy analizie i predykcji zapotrzebowania na energię dla portów lotniczych. Doktorant bardzo dobrze opanował narzędzie obliczeniowe Neural Network Matlab Toolbox, które wykorzystuje do predykcji zapotrzebowania na energię dla portów lotniczych. Warto zwrócić uwagę na bardzo praktyczny charakter niniejszej dysertacji, opracowane przez Doktoranta narzędzia obliczeniowe mogą przyczynić się do lepszego zarządzania energią dla portów lotniczych w kraju. Uważam, że praca doktorska spełnia wymagania stawiane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668, późn. zm.) dlatego też rekomenduję ją do publicznej obrony. Z uwagi na duży potencjał aplikacyjny opracowanego przez Doktoranta modelu predykcji zapotrzebowania portów lotniczych na energię elektryczną wnioskuję do Rady Naukowej Wydziału o wyróżnienie rozprawy.

