

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Instytut Energetyki Ciepłej

Streszczenie rozprawy doktorskiej

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

gen. dyw. mgr inż. Dariusz Łukowski

Promotor: Prof. dr hab. inż. Andrzeja Frąckowiak

Promotor pomocniczy: dr inż. Wojciech Prokopowicz

Recenzenci:

prof. dr hab. Artur Maciąg, Politechnika Świętokrzyska

dr hab. inż. Paweł Ocłoń, prof. PK – Politechnika Krakowska

dr hab. inż. Mieczysław Pawlisiak, prof. WAT – Wojskowa Akademia
Techniczna

Spis treści

1. WPROWADZENIE.....	3
2. TEZA PRACY.....	5
3. CEL PRACY	6
4. ZAKRES I METODA PRZEPROWADZONYCH ANALIZ I BADAŃ.....	7
5. WNIOSKI I ZASTOSOWANIE PRAKTYCZNE PRACY DOKTORSKIEJ..	23
BIBLIOGRAFIA.....	29

1. Wprowadzenie

Energia stanowi krytyczny czynnik decydujący o rozwoju gospodarczym, warunkach w jakich funkcjonuje społeczeństwo, wpływa na środowisko, ale jest również podstawowym elementem bezpieczeństwa każdego państwa oraz jego odporności ekonomicznej, gospodarczej, a także militarnej. Kluczowym elementem systemu bezpieczeństwa państwa są siły zbrojne, które podobnie jak pozostali odbiorcy są beneficjentem krajowego systemu energetycznego. Koszty, trwałość dostaw oraz efektywność wykorzystania energii decydować może o zapewnieniu skuteczności i ciągłości działań bojowych. Koncentrując się na podtrzymaniu zdolności instalacji wojskowych do działań w różnych warunkach, szczególnie, gdy dostawy energii mogą być zakłócone z powodów technicznych, dystrybucyjnych, czy też zakłóceń wynikających z celowych działań, tak zwana odporność energetyczna nabiera szczególnego znaczenia.

Bazy lotnicze stanowią doskonały przykład instalacji wojskowych, których funkcjonowanie i realizacja zadań jest uzależniona od stałego zasilania energetycznego. Trzeba również pamiętać, że stale rosnąca świadomość społeczna związana z ochroną środowiska i wprowadzane mechanizmy ochronne obejmują również Siły Zbrojne. Aspekt ekonomiczny jest również niebagatelny, bowiem roczny koszt energii pochłania w resorcie obrony około 250 mln. złotych a ta liczba stale rośnie. Biorąc powyższe pod uwagę niezbędna jest weryfikacja możliwości optymalizowania oraz uniezależnienia instalacji wojskowych od zewnętrznych źródeł energii. Prace w tym obszarze podjęły kilkanaście lat temu Siły Zbrojne Stanów Zjednoczonych definiując pojęcie *energy of installation*¹, oraz wdrażając ambitny program pod nazwą *Net Zero Installation*². Siły Powietrzne USA zakładają, że do końca 2030 roku wszystkie bazy lotnicze będą spełniały wyśrubowane wymagania w zakresie bezpieczeństwa energetycznego, przy jednoczesnej optymalizacji i zachowaniu niezbędnych proporcji między

¹ Energy of installations – energia stałej infrastruktury

² Net Zero Installation – Instalacje samowystarczalne

zasilaniem zewnętrznym i produkcją energii ze źródeł własnych. Podobny wysiłek podjęło również wiele armii europejskich. W Polsce wciąż nie nadano temu zagadnieniu właściwej rangi, ale rosnące zagrożenia hybrydowe, w tym coraz powszechniejsze próby ataków na infrastrukturę krytyczną, wymuszają przyjęcie nowych rozwiązań uwzględniających bezpieczeństwo energetyczne instalacji wojskowych. Budowa świadomości energetycznej to proces złożony, wymagający odpowiednio przygotowanego personelu, struktur, kompetencji narzędzi pomiarowych i analitycznych oraz systemu nadzoru i kontroli. W niniejszym dezyderacie pojęto próbę optymalizacji zasilania energetycznego baz lotniczych przy pomocy zaawansowanych narzędzi służących do aproksymacji potrzeb oraz analiz możliwości zastosowania alternatywnych źródeł energii odnawialnej. W pracy skupiono się na zużyciu energii cywilnej infrastruktury lotniczej i podjęto próbę przełożenia otrzymanych wyników analiz na grunt sił zbrojnych. W ramach programów UE ukierunkowanych na dekarbonizację środowiska naturalnego powstało wiele projektów związanych z poprawą efektywności energetycznej lotnisk cywilnych. Według Urzędu Publikacji Unii Europejskiej codzienne zużycie energii elektrycznej przez duży port lotniczy porównywalne jest do zapotrzebowania stu tysięcznego miasta. Według danych Eurostatu produkcja energii w UE w ostatnich latach spadała, a ceny rosły.³ Stąd, oprócz dbałości o środowisko naturalne, podjęto liczne zabiegi związane z redukcją zapotrzebowania na energię. Powstało szereg programów takich jak CASCADE, który pilotażowo realizowano w portach lotniczych w Rzymie i Mediolanie. Jego celem była budowa systemu zarządzania instalacjami grzewczymi, klimatyzacyjnymi i wentylacyjnymi (HVAC), w sposób pozwalający na istotną redukcję emisji CO₂ oraz zużycia energii, o co najmniej dwadzieścia procent⁴. W dezyderacie analizie poddano procesy zapewniające zwiększenie efektywności

³ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_production,_consumption_and_market_overview#Market_shares, (dostęp: 21.05.2021)

⁴ <https://cordis.europa.eu/article/id/93078-cascade-reducing-energy-use-by-airports/pl>

energetycznej w cywilnych portach lotniczych, które przy uwzględnieniu istotnych różnic między instalacjami wojskowymi a cywilnymi pozwolą wskazać rozwiązania możliwe do wykorzystania w Siłach Zbrojnych.

W pracy dokonano przeglądu istniejącej infrastruktury energetycznej oraz procedur odpowiadających za zapewnienie właściwego zasilania energetycznego baz. W pracy zaprezentowano model predykcji zapotrzebowania na energię elektryczną dla tego typu instalacji z uwzględnieniem czynników zewnętrznych mających wpływ na zużycie energii. Na bazie wniosków zaproponowano autonomiczny system infrastruktury zabezpieczającej bazę lotniczą pod względem energetycznym w oparciu o źródła odnawialne. Poruszana tematyka stanowi przyczynek do opracowania Systemu Optymalizacji Zużycia Energii (SOZE) w siłach powietrznych z możliwością rozszerzenia go na pozostałą infrastrukturę Sił Zbrojnych.

2. Teza pracy

Wobec przedstawionych na wstępie zagadnień zachodzi potrzeba przeprowadzenia analizy źródeł faktycznego zużycia energii baz lotniczych oraz zdefiniowania zależności tego zużycia od parametrów środowiskowych i określenia parametrów niezbędnych do konfiguracji alternatywnych źródeł energii.

W tym celu autor postawił następującą tezę:

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.

Teza ta wynika z założenia, że wykorzystując sztuczną sieć neuronową oraz dane o zużytej energii (pochodzącą z odczytu liczników pomiarowych) oraz inne dane zewnętrzne związane ze zużyciem energii, można dokonać predykcji potrzeb oraz zbudować inteligentny system pomiarowy do prowadzenia właściwej gospodarki energetycznej, obniżając tym samym koszty funkcjonowania baz lotniczych. Wykorzystanie tego typu narzędzi do projektowania, budowy i modernizacji obiektów instalacji lotniskowych w oparciu o odnawialne źródła energii pozwoli na zwiększenie odporności i autonomii funkcjonowania obiektów.

3. Cel pracy

Aby potwierdzić postawioną tezę, cel pracy można sformułować następująco:

Celem pracy jest 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. Celem jest również 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 odłączenia od sieci dystrybucyjnej.

Aby ten cel osiągnąć zgromadzono obszerne dane obejmujące tego typu projekty i analizy dla cywilnej infrastruktury lotniskowej. Ze względu na wrażliwość danych rzeczywistych instalacji wojskowych przyjęto rzeczywiste profile obciążenia dla portu lotniczego San Francisco oraz zdefiniowano istotne

parametry meteorologiczne mające wpływ na zapotrzebowanie mocy i kalkulacje związane z pozyskaniem energii wiatrowej i słonecznej. Jako metody analiz i modele matematyczne wykorzystano modele sieci neuronowych typu perceptron wielowarstwowy z regułami uczenia nadzorowanego (z nauczycielem). Jako narzędzie obliczeniowe wykorzystano pakiet bibliotek Neural Network Toolbox wykonany przez amerykańską firmę Math-Works dla programu Matlab.

4. Zakres i metoda przeprowadzonych analiz i badań

Głównymi źródłami energii dla portów lotniczych są energia elektryczna i paliwa takie jak gaz naturalny, benzyna lotnicza, olej napędowy, czy propan. Największe jest jednak zapotrzebowanie na energię elektryczną.

Zasadniczą część energii w porcie lotniczym pochłania infrastruktura. Obiekty stałe odpowiadają za około 20 do 40% konsumpcji energii na świecie⁵ (w zależności od stopnia rozwoju kraju). Tradycyjnie port lotniczy składa się z części lądowej odpowiadającej za obsługę pasażera i części powietrznej związanej ze statkami powietrznymi. Część lądowa to terminale pasażerskie, terminale cargo i parkingi. Część powietrzna to wszystkie instalacje związane z ruchem powietrznym takie jak wieża kontroli lotów, oświetlenie lotniska, pasy startowe, drogi kołowania, płaszczyzny postojowe, systemy radionawigacyjne, budynki straży pożarnej, hangary, składy paliw, czy też stacje meteorologiczne.

Największym odbiorcą energii są terminale pasażerskie, przy czym duże zapotrzebowanie na energię generują systemy ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji HVAC⁶), systemy oświetleniowe, informacyjne i łączności (ICT⁷).

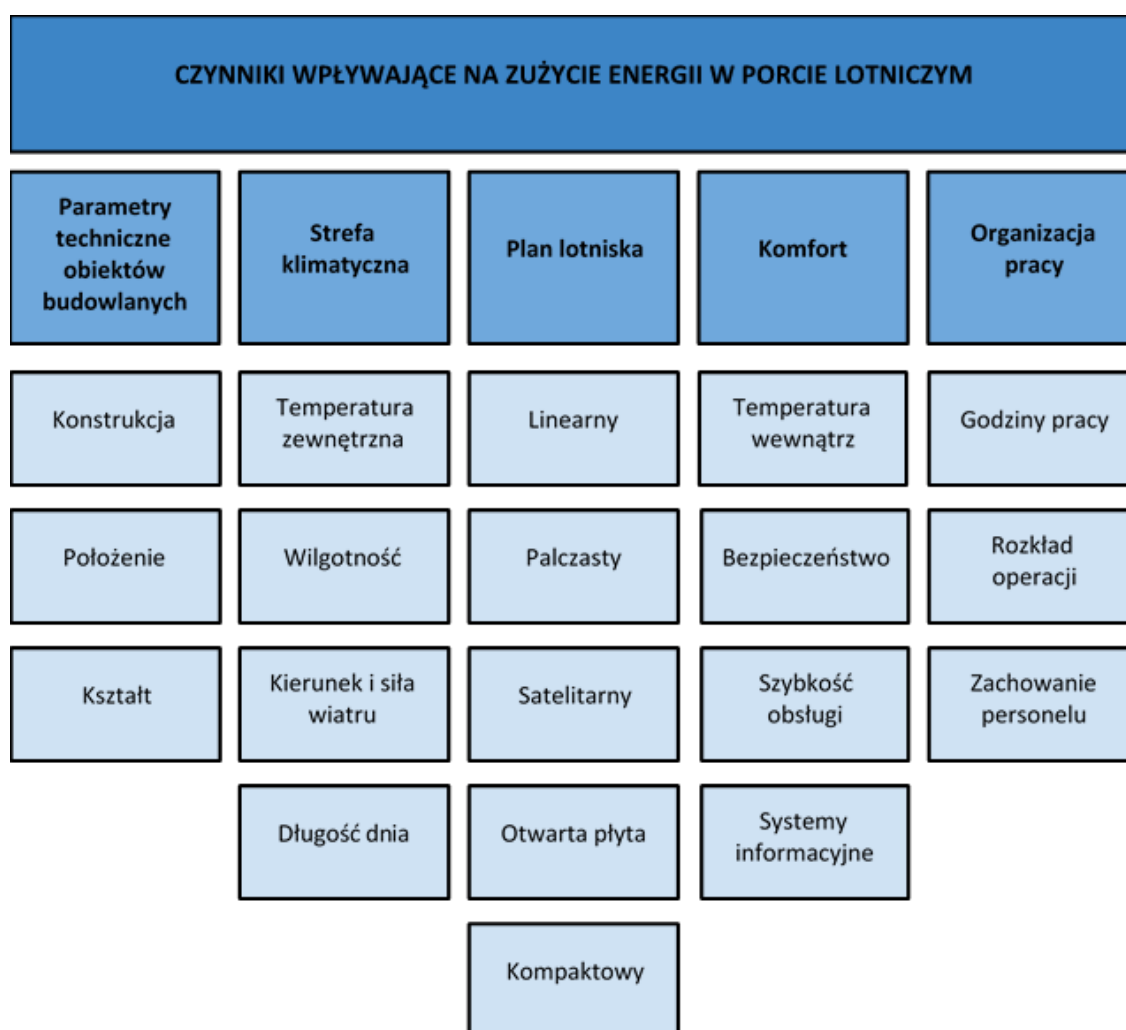
⁵Pérez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. A review on buildings energy consumption information. *Energy Build.* 2008, 40, 394–398.

⁶ HVAC - Heating Ventilation Air Conditioning

⁷ ITC - Information and Communications Technologies

Analizy zużycia energii przez cywilne porty lotnicze wskazują, że charakterystyki te są stochastyczne, nieliniowe i bardzo dynamiczne⁸. Zależą one od wielu czynników.

W pracy dokonano klasyfikacji czynników według układu przedstawionego na rys. 1.



Rys. 1 Czynniki wpływające na zużycie energii elektrycznej w cywilnym porcie lotniczym (opracowanie własne)

Według niej zużycie energii w porcie lotniczym zależy między innymi od:

— parametrów technicznych obiektów budowlanych;

⁸ Yang, C.; Jin, X.; Du, Z.; Fan, B.; Yang, X. Modeling and simulation of the airport terminal air conditioning system based on Energyplus. J. Shanghai Jiaotong Univ. 2010, 44, 745–748.

- architektury lotniska (plan);
- stref klimatycznych, w jakiej funkcjonują porty lotnicze (komfort);
- standardów obsługi i warunków zaoferowanych pasażerom;
- sposobu organizacji pracy obiektów.

Następnie zdefiniowano metody poprawy efektywności energetycznej cywilnych portów lotniczych. Ustalono, że z zasady tylko około 40% braku wydajności energetycznej wynika bezpośrednio z niewłaściwej konstrukcji infrastruktury, a pozostałe około 60% braku wydajności to czynniki, które można poddać kontroli i zarządzaniu oraz zminimalizować⁹.

Strategie poprawiające efektywność energetyczną portów lotniczych można podzielić na te związane z optymalizacją, czy też redukcją zapotrzebowania na energię oraz koncentrujące się na wdrażaniu rozwiązań opartych na pozyskiwaniu energii z innych, tańszych i neutralnych dla środowiska źródeł. Na tej podstawie w dysertacji zdefiniowano metody poprawy efektywności energetycznej (rys. 2), które poddano szczegółowej analizie.

Metody te podzielono na trzy zasadnicze grupy:

- bazujące na zmniejszeniu zapotrzebowania na energię;
- wynikające z przyjętego systemu zarządzania i kontroli;
- związane z zastosowaniem alternatywnych źródeł energii, w tym źródeł energii odnawialnej, ogniw paliwowych, zautomatyzowanych systemów sterowania nimi (mikrosieci) oraz ko- i trigeneracji.

Szczególny nacisk położono na istotną grupę przedsięwzięć decydujących o poprawie efektywności energetycznej portów lotniczych związanych z systemem zarządzania i nadzoru. Jednym z kluczowych elementów jest wdrożenie systemu zarządzania energią w oparciu o normę ISO 50001. Ta międzynarodowa norma jest jednym z dostępnych układów zarządzania o obiegu zamkniętym. Wykorzystuje ona cykl zarządzania przedsiębiorstwem opracowany przez W. Edwardsa Deminga (często przyjmuje nazwę koła Deminga), który

⁹ Kit Oung Zarządzanie energią w przedsiębiorstwie PWN SA Warszawa 2015 r. str. 27



Rys. 2 Metody poprawy efektywności energetycznej portów lotniczych (opracowanie własne)

obejmuje realizację czterech etapów: planowania, wykonania, sprawdzenia i poprawiania¹⁰. Często używa się określenia koło PDCA (Plan-Do-Check-Act).

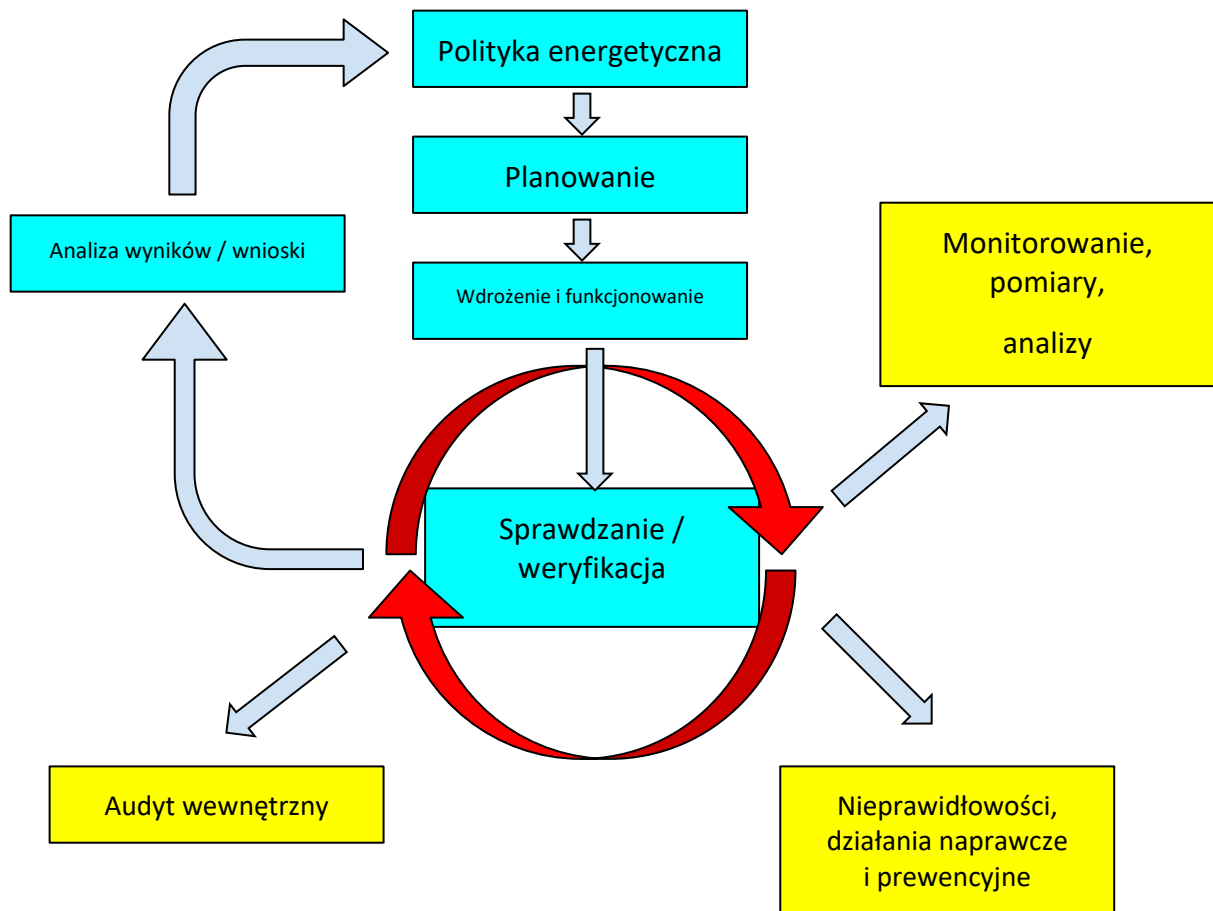
Model zarządzania energią w porcie lotniczym, który zbudowano w oparciu o ISO 50001 ilustruje rys. 3¹¹.

Dokonano szczegółowej analizy możliwości wykorzystania alternatywnych (w tym odnawialnych źródeł energii) w portach lotniczych oraz występujących w tych obiektach szczególnych uwarunkowań mających wpływ na ich zastosowanie. Zwłaszcza zastosowanie fotowoltaiki oraz energii wiatrowej wymaga uwzględnienia oddziaływania tych źródeł na infrastrukturę krytyczną z punktu widzenia bezpieczeństwa prowadzonych operacji lotniczych. Towarzyszące tym rozwiązaniom ryzyka dotyczą między innymi odbicia promieniowania słonecznego od paneli słonecznych i powstania zjawiska lśnienia, niebezpiecznego dla pilotów oraz wieży kontroli lotów, czy też zjawiska interferencji z układami komunikacyjnymi samolotu pracującymi w podczerwieni ze względu na wysoką temperaturę pracujących ogniw. W przypadku turbin wiatrowych występuje problem naturalnych przeszkód terenowych w strefie lotniska (wiatraki) oraz radioelektroniczny, w postaci zakłócania obrazowań radarowych i radiokomunikacyjnych. Zwrócono uwagę na duży potencjał rozwojowy ogniw paliwowych i możliwości zastosowania tego rozwiązania w lotnictwie między innymi:

- jako pomocnicze zasilanie samolotów (APU - Aircraft Auxilary Power Unit);
- jako generatory do produkcji prądu i ogrzewania obiektów lotniskowych (główne i zapasowe);
- jako lotnicze naziemne urządzenia zasilające (GPU-Ground Power Unit);
- do zasilania sprzętu obsługi naziemnej (ciągniki, cysterny, pojazdy cateringu, wózki i podnośniki, specjalistyczny sprzęt przeładunkowy).

¹⁰ Kit Oung *Zarządzanie energią w przedsiębiorstwie* PWN SA Warszawa 2015 r. str. 145

¹¹ ISO (International Organization for Standardization) (2011) ISO 50001 energy management systems—requirements with guidance for use. ISO Central Secretariat, Geneva



Rys. 3 Model zarządzania w porcie lotniczym w oparciu o ISO 50001 (opracowanie własne)

W dysertacji odniesiono się również do mikrosieci jako elementu zarządzania siecią energetyczną, które ułatwiają wzajemne powiązanie zastosowanych odnawialnych źródeł energii, innych źródeł energii generowanej przez port lotniczy (w tym pracujących systemów w ramach ko- i trigeneracji), systemów magazynowania energii oraz transferu energii z oraz do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej. Najważniejszą cechą mikrosieci jest zdolność do zarządzania dystrybucją i potrzebami zasilania w energię wewnątrz portu lotniczego. Wprowadzanie tego typu rozwiązań pozwala na skoncentrowanie dostępnej energii na jego krytycznych funkcjonalnościach, biorąc pod

uwagę priorytety oraz bezpieczeństwo operacji lotniczych w przypadku odcięcia od zewnętrznej sieci dystrybucyjnej.

Jako podstawowe zalety zastosowania mikrosieci wskazano:

- zapewnienie nieprzerwanego dostępu do energii elektrycznej;
- niezawodność i redundantność systemu zasilania zwiększająca odporność instalacji na przerwy w dostawach energii z zewnątrz i z poszczególnych źródeł;
- obniżenie kosztów funkcjonowania instalacji poprzez ograniczenie wrażliwości na wzrost cen energii dostarczanej z sieci zewnętrznej;
- elastyczność w dostosowywaniu struktury wewnętrznej do potrzeb portu lotniczego;
- stały monitoring wszystkich urządzeń odbiorczych, skuteczny nadzór nad sprawnością całego systemu i efektywne zarządzanie energią.

Magazyny energii w ramach mikrosieci wykorzystywane są jako źródła energii rezerwowej. Do technologii umożliwiających magazynowanie energii elektrycznej możemy zliczyć:

- elektrownie wodne szczytowo-pompowe;
- akumulatory;
- pneumatyczne zasobniki energii (CAES – ang. Compressed Air Energy Storage);
- superkondensatory;
- kinetyczne zasobniki energii (kola zamachowe);
- nadprzewodzące zasobniki energii (SMES- ang. Superconducting Magnetic Energy Storage);
- ogniwa paliwowe pracujące w układach z elektrolizerami i magazynowaniem wodoru.

W pracy dokonano charakterystyki wojskowej bazy lotniczej, zwracając szczególną uwagę na występujące różnice w stosunku do cywilnego portu lotniczego.

Wojskowe bazy lotnicze mają odmienną strukturę organizacyjną i przeznaczenie w stosunku do cywilnych portów lotniczych. Ze względu na znaczenie baz w systemie bezpieczeństwa kraju, w niniejszym dezyderacie, skupiono się wyłącznie na tych

elementach, które są związane z zasilaniem energetycznym, pomijając wrażliwe aspekty operacyjne.

Podstawowa różnica między portem cywilnym a wojskowym polega na innym rozkładzie energii pomiędzy poszczególnych odbiorców. O ile w cywilnych portach lotniczych największym konsumentem energii są terminale pasażerskie (77%) to w przypadku lotnisk wojskowych, wyposażonych w samoloty uderzeniowe, będą to hangary techniczne, urządzenia radionawigacyjne oraz obiekty zabezpieczające (składy paliw, strażnice ppoż, obiekty szkoleniowe, kontroli lotów i oświetlenie lotniska). Natomiast w przypadku wojskowego lotnictwa transportowego infrastruktura czerpie z rozwiązań lotnictwa cywilnego.

W lotnictwie wojskowym sposoby optymalizacji zużycia energii będą determinowane przez zadania. Bazy lotnicze nie są podmiotami gospodarczymi z określonymi celami biznesowymi. W ich przypadku podstawą tych działań powinny być:

- zwiększenie odporności instalacji wojskowej na przerwy w dostawie energii celem zagwarantowania utrzymania gotowości do podjęcia działań operacyjnych zgodnie z przeznaczeniem;
- obniżenia kosztów funkcjonowania systemu utrzymywanego ze środków publicznych;
- spełnienie wymogów przepisów ogólnokrajowych związanych z ochroną środowiska i dostosowaniem obiektów do obowiązujących wymagań w zakresie standardów energetycznych;
- zapewnienie zdolności do rozwinięcia elementów lotniskowych w innych lokalizacjach przy użyciu zdolnych do przerzutu modułów zabezpieczenia (często bez możliwości przyłączenia się do komercyjnej sieci dystrybucyjnej, a więc wymuszającej generację energii ze źródeł własnych).

Zaprezentowana analiza wskazuje, że system zarządzania obszarem energetycznym w siłach zbrojnych jest bardzo scentralizowany. Struktura organizacyjna

zajmująca się problematyką efektywności energetycznej nie jest wystarczająca do zabezpieczenia efektywnego zarządzania energią.

Należy stwierdzić, że w zasobie resortu obrony narodowej praktycznie brak ekspertów z obszaru energetyki, a szkolnictwo wojskowe nie kształci w tym kierunku. Niemniej jednak kwestia efektywności energetycznej, czy nawet samowystarczalności lub autonomii energetycznej ma największe znaczenie właśnie dla lotnictwa wojskowego. Zdolność bojowa lotnictwa zależy bezpośrednio od nieprzerwanej pracy krytycznych elementów infrastruktury lotniskowej. Zwrócono uwagę, na transformację w podejściu do zagadnienia bezpieczeństwa energetycznego i ochrony środowiska w Sojuszu Północnoatlantyckim i wybranych krajach Paktu.

W naszym przypadku potencjalne przerwy w dostawie energii elektrycznej do lotniczych baz wojskowych w skrajnym przypadku może stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa narodowego. Instalacje sił powietrznych w Polsce są zasilane wyłącznie z zewnętrznych sieci dystrybucyjnych. Stosowane rozwiązania zasilania awaryjnego z użyciem głównie generatorów spalinowych mają zastosowanie w sytuacji krótkotrwałych przerw i nie zapewniają ciągłości działania baz w przypadku dłuższego braku zasilania z zewnątrz. Przyczyny tych przerw mogą być różne na przykład:

- spowodowane katastrofami naturalnymi (wiatr, oblodzenie, osuwiska gruntu pod wpływem intensywnych opadów);
- w wyniku awarii przestarzałej infrastruktury;
- wynikające z przeciążenia sieci (np. w upalne dni okresu letniego następuje gwałtowny skok zapotrzebowania);
- w efekcie działań celowych (sabotaż fizyczny lub cyberatak);
- jako efekt zwykłych błędów ludzkich.

Przeprowadzone analizy pokazują, że, mimo iż cele, priorytety i zasady finansowania zadań związanych z poprawą efektywności energetycznej baz lotniczych i portów lotniczych są nieco inne, to narzędzia stosowane do tego celu są bardzo podobne.

Duży nacisk w dysertacji położono na zagadnienie związane identyfikacją profilu energetycznego lotniska. Stanowi to klucz do zaprojektowania systemu zasilania,

odpowiedniego dla przyjętej strategii poprawy efektywności energetycznej. Zidentyfikowany profil energetyczny obiektu militarnego, jest to najważniejszy element w systemie zarządzania, realizowany na etapie planowania.

Punktem wyjścia do analizy i modelowania procesów zużycia energii, jest zgromadzenie niezbędnych danych administracyjnych, statystycznych i meteorologicznych. Kluczowe są dane związane ze strukturą obiektów lotniskowych i urządzeń odbiorczych, dane dotyczące statystyk związanych z funkcjonowaniem lotniska (liczba odprawionych pasażerów, liczba lotów, masa przewiezionych ładunków) oraz warunki klimatyczne wynikające z położenia geograficznego obiektu.

Następnym krokiem jest zgromadzenie danych historycznych dotyczących zużycia energii elektrycznej. Sposób opomiarowania instalacji lotniskowych ma zasadnicze znaczenie w procesie identyfikacji odbiorników energii i ich klasyfikacji według typów urządzeń odbiorczych, obiektów, w których są zainstalowane oraz ich lokalizacji na terenie lotniska.

Odbiorniki energii podzielono na¹²:

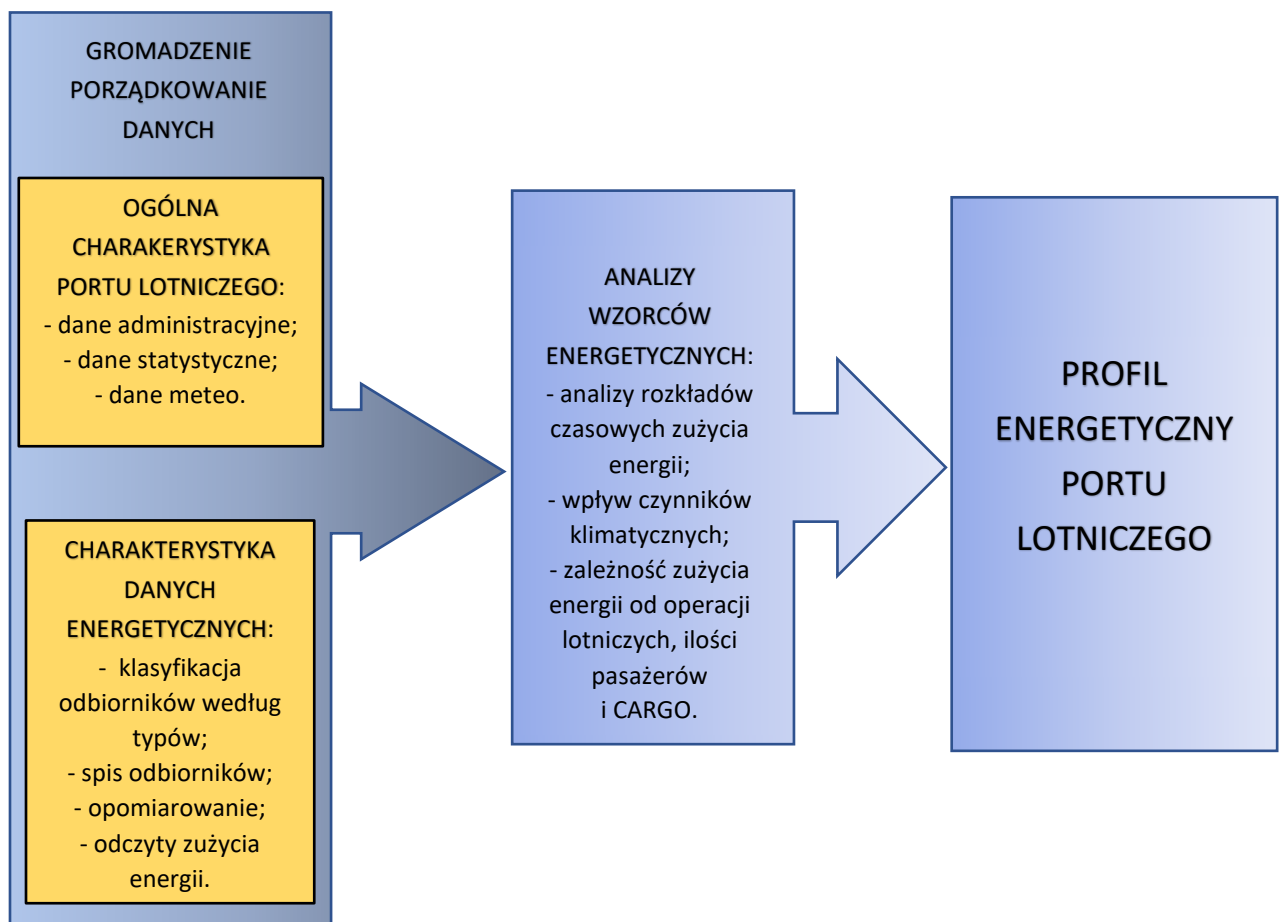
- stale zasilane;
- zasilane standardowo w czasie pracy lotniska;
- zasilane dynamiczne w zależności od potrzeb.

Analiza zużycia energii w poszczególnych grupach odbiorników pozwala na zbudowanie modelu zużycia energii w funkcji czasu dla wskazanej infrastruktury. Dane te pozwalają na identyfikację procesu zmian zapotrzebowania na energię w porcie lotniczym w układzie dobowym. Można również rozwinąć ten model do badania zużycia w cyklu tygodniowym, miesięcznym, czy rocznym. Wiarygodność i precyzja tych danych zależy od: sposobu opomiarowania, technik rejestracji, przetwarzania i interpretacji danych. Liczba punktów pomiarowych i częstotliwość odczytów decyduje o jakości budowanego modelu. Dane te mogą być wsparte wiedzą personelu pracującego z wykorzystaniem poszczególnych odbiorników lub obsługi technicznej.

¹² Ortega, S.; Manana, Characterization and Analysis of Energy Demand Patterns in Airports. Energies 2017. file:///C:/Users/Dariusz%20%20C5%81ukowski/Downloads/energies-10-00119%20(2).pdf. Wejście 14.06.21

Może ona obejmować sposób wykorzystania, sposób regulacji czasu pracy, czy awaryjność systemów.

Zbudowanie tego typu charakterystyki w połączeniu z identyfikacją poszczególnych kategorii odbiorników, ich lokalizacji w obiektach portu lotniczego i roli w zabezpieczeniu jego funkcjonowania, jest kluczem do zrozumienia zależności i właściwej oceny czynników warunkujących wielkość zużycia energii, w tym źródeł strat i potencjalnych oszczędności. Typowym źródłem analizy powinny być miesięczne rachunki za energię, zastosowane taryfy i miesięczne koszty przeglądów i napraw wszystkich instalacji odbiorczych oraz dane operacyjne (liczba pasażerów, lotów, masa obsłużonych ładunków cargo, trendy zmian i ich wpływ na zużycie energii). Na tej podstawie można dokonać szczegółowych analiz związanych z zależnością zużycia energii od czynników zewnętrznych, budując w ten sposób model energetyczny portu lotniczego, stanowiący punkt wyjścia do prac nad poprawą efektywności energetycznej.



Rys. 4 Schemat budowy profilu energetycznego portu lotniczego (opracowanie własne na podstawie Ortega, S.; Manana, M.Characterisation and Analysis of Energy Demand Patterns in Airports. Energies 2017.)

Na rysunku 4 zilustrowano zaproponowaną metodykę identyfikacji modelu energetycznego dla portu lotniczego. Analizy energetyczne wskazują, że najwyższe współczynniki korelacji zużycia energii elektrycznej występują dla czynników klimatycznych¹³. W tej grupie wskaźniki przedstawiają się następująco:

- średnia miesięczna temperatura – 0,72;
- sumaryczna liczba godzin słonecznych – 0,71;
- średnia miesięczna długość dnia – 0,61;
- sumaryczne miesięczne opady – 0,33.

Stąd każdorazowo analiza rozpoczyna się od badania zużycia energii w portach lotniczych w zależności od tych parametrów. Realizacja powyższego procesu pozwala na określenie stanu wyjściowego, stanowiącego podstawę do podjęcia następnego kroku jakim jest budowa modelu prognozowania zużycia energii, przy użyciu zidentyfikowanych kluczowych zmiennych, mających zasadniczy wpływ na jej zużycie.

Prognozowanie zużycia energii można podzielić na metody statystyczne, sztucznej inteligencji i mieszane (inaczej hybrydowe). W literaturze można znaleźć również inne, bardziej rozbudowane klasyfikacje obejmujące na przykład podejście do modelowania oparte na kalkulacjach (obliczeniowe) oraz oparte na pomiarach (pomiarowe)¹⁴.

Metody sztucznej inteligencji, podobnie jak statystyczne, wykorzystują dane historyczne odzwierciedlające zachowanie systemów energetycznych. Cechą charakterystyczną metod *Artificial Intelligence* (AI), opartych o sieci neuronowe, jest zdolność do uchwycenia złożonych nieliniowych zależności między sygnałami wejścia i wyjścia. Ta cecha powoduje, że sieci neuronowe, przy wykorzystaniu techniki selekcji

¹³ Piotr Helt, Mirosław Parol, Paweł Piotrowski Metody sztucznej inteligencji. Przykłady zastosowań w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012: str. 91

¹⁴ Wang, S.; Yan, C.; Xiao, F. Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. Energy Build. 2012, 55, 873–888.

danych wejściowych, są uznawane za najpowszechniejsze narzędzie do prognozowania zużycia energii w obiektach budowlanych¹⁵.

To zdecydowało, że na potrzeby niniejszej dysertacji ograniczono się do zastosowania w procesie modelowania zużycia energii portu lotniczego metod sztucznej inteligencji opartych na sieciach neuronowych. Uwagę skoncentrowano na modelu matematycznym neuronów typu Perceptron. Jest to dyskretny model McCullocha-Pittsa z regułą uczenia polegającą na minimalizacji różnicy między wartością wyjściową sygnału a wartością zadaną (tzw. nauka z nauczycielem)¹⁶. W modelu tym zastosowano neuronową architekturę jednokierunkowej sieci wielowarstwowej.

Do budowy modelu i przeprowadzenia badań wykorzystano oprogramowanie MATLAB. Zawiera ono między innymi bibliotekę *Neural Network Toolbox*, umożliwiającą budowę i wykorzystanie sieci neuronowych do prognozowania.

Aby zbudować sieć neuronową należało wykonać następujące kroki:

- zgromadzić dane;
- stworzyć sieć;
- skonfigurować sieć;
- zainicjować wagi
- przetestować sieć;
- zastosować sieć do predykcji.

W procesie badawczym posłużono się danymi uzyskanymi ze strony portu lotniczego San Francisco¹⁷. Z tego źródła pozyskano dane dotyczące zużycia energii elektrycznej na tym lotnisku za ostatnie siedem lat (2013-2019), z miesięcznym okresem próbkowania. Sposób prezentacji danych ma podobną szczegółowość jak odczyty zużycia energii elektrycznej przy obecnie funkcjonujących systemach zasilania wojskowych baz lotniczych w Polsce.

¹⁵ Almalaq and J. J. Zhang, Evolutionary Deep Learning-Based Energy Consumption Prediction for Buildings, in IEEE Access, vol. 7, pp. 1520-1531, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2887023.

¹⁶ Piotr Helt, Mirosław Parol, Paweł Piotrowski Metody sztucznej inteligencji. Przykłady zastosowań w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012: str. 21

¹⁷ <https://data.sfgov.org/d/gcjr-3mzf/visualization>, wejście 12.09.2021

Dane meteorologiczne dla tego portu lotniczego zostały pozyskane ze źródeł satelitarnych NASA (NASA *Prediction of Worldwide Energy Resources* - NASA POWER) z lat 2013-2019.

Na tej podstawie zbudowano zagregowany zestaw danych z lat 2013-2019 z rozbiciem na poszczególne miesiące:

- zużycie energii (w GWh);
- liczbę pasażerów;
- masę obsłużonych ładunków (tony);
- liczbę wykonanych lotów;
- efektywność energetyczną (zgodnie z rozdz.1.2.2 użyto najbardziej przydatnego wskaźnika efektywności energetycznej dla cywilnego portu lotniczego, określającego zużycie kWh energii na pasażera);
- średnią prędkość wiatru na wysokości 10 m (m/s);
- gęstość powietrza (kg/m^3);
- średnią temperaturę za miesiąc (C)
- ciśnienie (kPa);
- miesięczną średnią ilość całkowitego promieniowania słonecznego padającego na poziomą powierzchnię na poziomie ziemi ($\text{kWh/m}^2/\text{miesiąc}$);
- temperaturę termometru mokrego (C);
- wilgotność przy ziemi (%).

Powyższe dane zostały poddane analizie wpływu poszczególnych zmiennych na zużycie energii elektrycznej przez lotnisko, która wskazała, że wyselekcjonowane dane z dużym prawdopodobieństwem są przydatne jako dane wejściowe do modelowania predykcji z wykorzystaniem historycznych danych zużycia energii. Przyjęto, że czynniki operacyjne i pogodowe stworzą właściwy zbiór zmiennych do budowy modelu prognozowania w oparciu o sieci neuronowe.

Zgromadzone dane stworzyły macierz danych wejściowych i wyjściowych, która w środowisku MATLAB posłużyła do predykcji z wykorzystaniem modelu

wielowarstwowych sieci jednokierunkowych o sigmoidalnych funkcjach aktywacji neuronów w warstwie ukrytej i przy zastosowaniu wybranych algorytmów uczenia.

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. Uczenie w tym przypadku polega na minimalizacji funkcji błędu zależnej od różnic między wartościami zadanymi a rzeczywistymi z wyjścia sieci dla danych uczących.

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:

- *BGGS Quasi-Newton* (oznaczany BFG);
- *Levenberg-Marquardt* (oznaczany LM);
- *Bayesian Regularization* (oznaczany BR);

i jeden odporny algorytm uczenia:

- RBP odporny algorytm propagacji wstecznej (oznaczany RP).

Zastosowano sigmoidalne funkcje aktywacji neuronów w warstwie ukrytej.

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.

Uzyskane wyniki oceniono przy pomocy:

- współczynnika regresji R^2 , mierzącego korelację między sygnałem wyjścia, a zadanym celem (im wartość bliższa 1, tym wynik lepszy);
- błędu średniokwadratowego MSE , określającego jakość przetwarzania dla wszystkich zbiorów wykorzystanych w badaniu;
- błędu średniokwadratowego $RMSE$, wskazującego na dokładność prognozy w zadanym modelu.

Wyniki poszczególnych badań zostały zaprezentowane graficznie przy pomocy:

- wykresów błędu regresji dla sieci neuronowej jednokierunkowej z jedną warstwą ukrytą i różnymi liczbami neuronów a) 5, b) 10 i c) 15, przy zastosowaniu różnych algorytmów dla zbioru uczącego, walidacyjnego i testowego;
- wykresów oceny jakości walidacji dla sieci neuronowej wielowarstwowej z jedną warstwą ukrytą i 5-cioma, 10-cioma i 15-toma neuronami, przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP;
- wykresów dopasowania wyniku symulowanego i zmierzonego oraz błędu średniokwadratowego dla badania z wykorzystaniem sieci wielowarstwowej jednokierunkowej z 5-cioma, 10-cioma i 15-toma neuronami przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP;
- wykresów predykcji zużycia energii w modelu perceptronu wielowarstwowego jednokierunkowego z jedną warstwą ukrytą i 5-cioma, 10-cioma i 15-toma neuronami, przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP.

Uzyskane wyniki dla różnych struktur sieci neuronowej i algorytmów uczenia zostały zestawione w tabeli 1.

Tabela 1 Tabela wyników dla trzech sieci i czterech algorytmów uczenia (kolorem czerwonym zaznaczono najlepsze dane dopasowania dla algorytmu BR)

Algorytm	BFGS Quasi_Newton			Bayesian Regularization			Levenberg-Marquardt			Resilient Backpropagation		
	RMSE	MSE	R	RMSE	MSE	R	RMSE	MSE	R	RMSE	MSE	R
5 neuronów	0,70	0,37	0,82	0,26	0,03	0,98	0,60	0,66	0,88	0,72	0,26	0,82
10 neuronów	0,68	0,32	0,84	0,42	0,01	0,94	1,27	1,48	0,65	0,53	0,62506	0,90
15 neuronów	0,39	0,20	0,95	0,33	2,11E-15	0,96	0,38	0,50	0,95	0,68	0,35825	0,86

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

5. Wnioski i zastosowanie praktyczne pracy doktorskiej.

Przeprowadzone badania możliwości prognozowania zużycia energii w porcie lotniczym przy wykorzystaniu perceptronu wielowarstwowego potwierdziły przydatność tego narzędzia w procesie optymalizacji zużycia energii.

Należy pamiętać, że w rozpatrywanym przypadku badano tylko fragment z całego procesu optymalizacji energetycznej portu lotniczego opisanego w niniejszej dysertacji.

Ze względu na sposób pozyskania danych, nie przeprowadzono całego procesu związanego z identyfikacją profilu energetycznego lotniska San Francisco. Skutkiem tego niemożliwe było dokonanie precyzyjnej oceny czynników warunkujących wielkość zużycia energii. Zwłaszcza czynniki pogodowe, które zostały pozyskane ze źródeł NASA, a nie z urzędzeń lotniskowych mogą nie być wystarczająco precyzyjne. Dostępne informacje pozwoliły zbudować zbiór składający się z ciągu 84 rekordów danych (zużycie energii przez port lotniczy z lat 2013-2019, czyli za 84 miesiące). Jest to dość skromny zbiór do przeprowadzenia badań, ale jest on bardzo zbliżony do aktualnego sposobu odczytu energii w bazach lotniczych sił zbrojnych. Przy tak małym zbiorze uczącym sieć bardziej dopasowuje się do wszystkich danych występujących w zbiorze (w tym błędnych lub rozbieżnych), co zwiększa prawdopodobieństwo występowania zwiększonych błędów dla uzyskiwanych wyników.

Do badań wybrano najbardziej powszechnie stosowane algorytmy. Algorytmy Levenberga-Marquardta oraz Bayesian Regularization w ramach zadań związanych z aproksymacją uznawane są za najlepsze w zakresie uzyskiwania *MSE* ze wszystkich stosowanych metod¹⁸. Zaskoczeniem są wyniki uzyskane zwłaszcza przez algorytm

¹⁸ Murat Kayri, Predictive Abilities of Bayesian Regularization and Levenberg–Marquardt Algorithms in Artificial Neural Networks: A Comparative Empirical Study on Social Data, Dep. Of Computer Engineering,

Levenberga-Marquardta, który w wielu badaniach wykazuje swoją przewagę wobec innych algorytmów. Jest on uznawany za najszybszy, niezbyt złożony i stosowany niemal wyłącznie do trenowania średniej wielkości sieci jednokierunkowej z pojedynczym neuronem w warstwie wyjściowej. W tym przypadku, prawdopodobnie zbyt mały zbiór danych do trenowania oraz zdecydowanie mały rozmiar sieci, nie pozwoliły w pełni pokazać zalet tego algorytmu, w tym jego szybkości.

Badanie potwierdziło jednak, że zastosowanie algorytmu Bayesian-Regularization jest najbardziej efektywną metodą w zakresie zdolności do predykcji, znacznie lepszą od algorytmu LM.

Dla odmiany BFGS Quasi-Newton uznawany jest za algorytm bardziej złożony, ale jego właściwości doskonale sprawdzają się w małych sieciach, ze względu na złożoność realizowanych przez niego obliczeń. Potwierdziły to uzyskane wyniki, lokując ten algorytm na drugim miejscu w przeprowadzonym badaniu.

Odporny algorytm propagacji wstecznej RP, mimo zalety jaką jest eliminacja błędów zbioru uczącego nie zagwarantował dobrych rezultatów w uzyskanej predykcji. Okazało się, że jakość uczenia z użyciem tego algorytmu, przy stosunkowo małych rozmiarach sieci jakie zastosowano do badań, daje gorsze rezultaty od innych metod.

Reasumując, badanie wskazało, że perceptron wielowarstwowy jednokierunkowy z sigmoidalną funkcją aktywacji neuronów w warstwie ukrytej oraz przy zastosowaniu algorytmu uczenia Bayesian Regularization z powodzeniem może być wykorzystywany do predykcji zużycia energii lub zapotrzebowania na moc dla portów lotniczych.

Właściwe zbudowanie profilu energetycznego oraz systemu opomiarowania, znacznie poprawi zdolność sieci neuronowej do generalizacji, a tym samym wpisze się w model zarządzania w porcie lotniczym tworząc narzędzia do opracowania planu

poprawy efektywności energetycznej, jego wdrożenia oraz ciągłego monitorowania i oceny.

Dysertacja ma ogromne znaczenie praktyczne dla Sił Zbrojnych. Przeprowadzone analizy w zakresie czynników wpływających na zużycie energii w cywilnych portach lotniczych oraz metod poprawy efektywności energetycznej, jak również charakterystyka porównawcza obu typów obiektów lotniskowych wskazuje na możliwość pełnej adaptacji tych rozwiązań w bazach lotniczych.

Można stwierdzić, że w przypadku baz lotniczych głównym argumentem przemawiającym za zwiększaniem efektywności energetycznej powinno być w pierwszej kolejności bezpieczeństwo energetyczne, a następnie koszty funkcjonowania.

Należy pamiętać, że bazy lotnicze stanowią najbardziej krytyczną infrastrukturę Sił Zbrojnych, ponieważ zapewniają bezpośrednie wsparcie lotnictwa dla działań bojowych. Z tego powodu wymagania w zakresie odporności na potencjalne przerwy w dostawach energii ze źródeł zewnętrznych, niezawodność pracy systemów zasilania, odporność na cyberataki powinna znacznie przewyższać potrzeby lotnisk cywilnych. Dlatego niezbędne są inwestycje związane z budową zaawansowanych mikrosieci, alternatywnych źródeł energii z zastosowaniem technologii magazynowania energii, a więc dążenie do budowy modelu wyspowego sieci energetycznej. Powinno to zostać poprzedzone analizą zużycia energii i predykcją jej zapotrzebowania.

Drugi aspekt, związany z kosztami jest niemniej ważny. Bazy lotnicze utrzymywane są ze środków publicznych. Aspekt kosztów nabiera szczególnego wymiaru w dobie ciągłego wzrostu kosztów energii, przekraczającego dotychczasowe prognozy.

Uzyskane wnioski z analiz oraz wyniki badania wskazują na potrzebę opracowania i implementacji następujących możliwych do zastosowania, a opisanych w dysertacji, rozwiązań organizacyjno-technicznych zabezpieczających zasilanie infrastruktury w bazach lotniczych obejmujących:

- szerokie zastosowanie audytu energetycznego;

- budowę systemu zarządzania energią (mikrosieci), jako narzędzia skonstruowanego w oparciu oprogramowanie bazodanowe i wizualizacyjne, z możliwością komunikacji z innymi urządzeniami takimi jak odpowiednio rozmieszczone mierniki, regulatory, kompensatory mocy biernej, czujniki, rejestratory czy przełączniki. System sterujący może być oparty o model regresyjny z wykorzystaniem narzędzi zademonstrowanych w niniejszej dysertacji;
- szerokie włączenie w ten system alternatywnych źródeł energii – analizy wskazały fotowoltaikę, energię wiatrową (z pewnymi ograniczeniami) oraz ogniwa wodorowe, jako najbardziej perspektywiczne i powszechne w lotnictwie cywilnym, a więc możliwe do wdrożenia w bazach lotniczych, stosowane jako systemy zintegrowane z infrastrukturą lotniskową;
- zastosowanie rozwiązań kogeneracji i trigeneracji jako narzędzia do poprawy efektywności zużycia energii elektrycznej w systemach energetycznych

Omawiane rozwiązania mogą być również z powodzeniem wdrażane w grupie urządzeń mobilnych (samobieżnych, ciągnionych lub przewoźnych) do zabezpieczenia procesów eksploatacji samolotów lub innych mobilnych elementów bazy lotniczej mających za zadanie zabezpieczenie wykonanie zadania lotniczego w oparciu o doraźnie przygotowaną infrastrukturę lotniskową poza macierzystą dyslokacją.

Urządzenia te odpowiadają również za podtrzymanie zasilania na lotnisku w przypadku przerw w dostawach z krajowego systemu dystrybucyjnego. Urządzenia mobilne przeznaczone do zabezpieczenia obsługi samolotów takie jak dystrybutory przeznaczone do napełniania statków powietrznych sprężonymi gazami (tlen i azot), czy też gazyfikatory tlenu i azotu mają możliwość zasilania ze źródła elektroenergetycznego własnego zintegrowanego, zewnętrznego generatora prądu lub ze stałej sieci dystrybucyjnej.

Lotniskowe urządzenia zasilania elektroenergetycznego samolotów (LUZES) są wykorzystywane w wersji samobieżnej (zamontowane na pojeździe) oraz w wersji holowanej (na przyczepie), z własnymi generatorami energii elektrycznej. Stosowane

są również zasilacze stacjonarne, zasilanie z sieci stałej obiektów lotniskowych. Urządzenia te pozwalają zasilać pokładowe systemy statków powietrznych, uruchamiać silniki, sprawdzać stan techniczny urządzeń pokładowych podając prąd stały lub zmienny o różnych fazach i napięciu. Ponadto wykorzystywane są takie urządzenia mobilne jak: sprężarki powietrza, zasilacze hydrauliczne, urządzenia oświetleniowe, czy osuszacze służące do osuszania wybranych przedziałów samolotów i śmigłowców.

Wszystkie te urządzenia powinny podlegać modyfikacji w zakresie poprawy ich efektywności, redukcji zapotrzebowania na paliwo oraz ograniczenia emisji. Potrzeby te nie wynikają wyłącznie z wymagań związanych z ochroną środowiska. Wykonywanie zadań poza macierzystą dyslokacją w sposób bezpieczny i efektywny wymaga skrócenia ogona logistycznego (zabezpieczenia paliwa do generatorów) oraz realizacji zadań w sposób skryty. Klasyczne generatory emitują ciepło i dźwięk demaskujący położenie rozwijanych elementów. Zastosowanie kombinacji źródeł energii słonecznej, wiatrowej, czy też ogni wodorowych oraz magazynów energii oraz spięcie ich w ramach mikrosieci znacznie poprawiłoby bezpieczeństwo i zdolność do realizacji zadań.

Wdrożenie rozwiązań zawartych w pracy uzależnione jest od wiedzy i budowy świadomości energetycznej w resorcie ON. Siły Zbrojne potrzebują wykształconych energetyków, a kadra kierownicza odpowiedzialna za finanse, infrastrukturę i logistykę, powinna przechodzić cykliczne szkolenia z obszaru szeroko rozumianego zarządzania energią. Zmianie powinien ulec system zarządzania tymi procesami. Niniejsza praca powinna przyczynić się do budowy świadomości energetycznej w Siłach Zbrojnych.

Opisana struktura baz lotniczych powinna ulec modyfikacji. W jej strukturze powinien pojawić się personel techniczny z odpowiednim przygotowaniem energetycznym. Do budowy tej struktury powinien być wykorzystany, opisany wcześniej, model zarządzania w porcie lotniczym w oparciu o ISO 50001.

Wojskowa Inspekcja Gospodarki Energetycznej (WIGE) nie jest w stanie w obecnej strukturze organizacyjnej wykonywać skutecznie nałożonych na nią zadań. Przypisane tej strukturze organizacyjnej zadania w ogromnej większości powinny być realizowane na poziomie kompleksów wojskowych, w tym baz lotniczych.

Biorąc pod uwagę specyfikę i znaczenie bezpieczeństwa energetycznego dla zdolności baz lotniczych do realizacji zadań operacyjnych, za które odpowiadają dowódcy baz, to właśnie oni powinni posiadać wiedzę i zdolność do realizacji tych procesów. To oni powinni wskazać w jaki sposób zredukować ryzyko nie wykonania nałożonych zadań ze względu na braki w zasilaniu energią.

WIGE nie jest w stanie skutecznie prowadzić procesu zarządzania we wszystkich obiektach infrastruktury, czy bazach lotniczych. Jak wynika z niniejszej dysertacji jest on bardzo złożony technicznie i wymaga ciągłego merytorycznego nadzoru na poziomie bazy. Rola WIGE powinna sprowadzać się do nadzoru nad dostosowywaniem resortowych przepisów energetycznych programów kształcenia i szkoleń do potrzeb realizowanej strategii. Organ ten może pełnić rolę komórki resortowej do wypracowania strategii energetycznej resortu, nadzoru nad jej wdrażaniem i ewolucją stosownie do potrzeb, zagrożeń, zmian na rynku i ewolucji w technologiach energetycznych stosownie do potrzeb zgłaszanych przez dowódców baz.

Budowa modelu kształcenia w tym zakresie wymaga udziału i wsparcia ze strony uczelni cywilnych posiadających zdecydowanie lepszy potencjał w tym obszarze niż Siły Zbrojne.

W procesie poprawy i nadzoru nad efektywnością energetyczną baz lotniczych do predykcji zapotrzebowania na energię można w pełni wykorzystać zaproponowane w pracy rozwiązanie z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej.

Bibliografia.

1. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_production,_consumption_and_market_overview#Market_shares,
2. <https://cordis.europa.eu/article/id/93078-cascade-reducing-energy-use-by-airports/pl>
3. Nowak Wiesław, Szpyra Waldemar, dr inż. Tarko Rafał, Stan i potrzeby rozwojowe sieci elektroenergetycznych w procesie transformacji niskoemisyjnej w Polsce. Europejski Instytut Miedzi, styczeń 2017
4. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_non-household_consumers
5. Kit Oung, Zarządzanie energią w przedsiębiorstwie, PWN SA, Warszawa 2015
6. Regulamin Lotów Lotnictwa Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej (RL-2016); wprowadzony do użytku Decyzją nr 179/Szkol/DGRSZ Ministra Obrony Narodowej z dnia 2 sierpnia 2016
7. Instrukcja Organizacji Lotów w Lotnictwie Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej (IOL-2016); wprowadzony do użytku Decyzją nr 180/Szkol/DGRSZ Ministra Obrony Narodowej z dnia 2 sierpnia 2016
8. Jerzy Jaźwiński, Krystyna Ważyńska-Fiok, Bezpieczeństwo systemów, Warszawa,; Wydawnictwo Naukowe PWN, 1993
9. Sierra Hicks, Powering the Department of Defense Initiatives to Increase Resiliency and Energy Security, American Security Project, wrzesień 2017
10. M.Świątek i F. Imbault, Better energy management by implementing an energy measuring and monitoring plan; 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/ICPS Europe), 2017
11. Zarządzanie Energią – Praktyczne Aspekty Obniżenia Kosztów Funkcjonowania Przedsiębiorstwa,; <https://www.bialecertyfikaty.com.pl/artykuly/zarzdzanie-energi-praktyczne-aspekty-obnienienia-kosztow-funkcjonowania-przedsiębiorstwa>
12. T.Hikmet Karakoc; C.Ozgur Colpan; Onder Altuntas; Yasin Sohret, Sustainable Aviation, Springer Nature Switzerland AG 2019
13. Perez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. A review on buildings energy consumption information. Energy Build. 40, 394–398, 2008
14. Zhao, H.-X.; Magoules, F. A review on the prediction of building energy consumption. Renew. Sustain. Energy Rev. 2012
15. Mena, R.; Rodríguez, F.; Castilla, M.; Arahall, M.R. A prediction model based on neural networks for the energy consumption of a bioclimatic building. Energy Build. 2014
16. Lu, X.; Lu, T.; Kibert, C.J.; Viljanen, M. Modeling and forecasting energy consumption for heterogeneous buildings using a physical-statistical approach. Appl. Energy 2015.
17. Piotr Helt, Mirosław Parol, Paweł Piotrowski Metody sztucznej inteligencji. Przykłady zastosowań w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012: str. 83
18. Prawo lotnicze, art. 2 ust. 4, Dz. U. 2006 Nr 100, poz. 696 z późn. zm.
19. Sławomir Kalinowski “Analiza wskaźnikowa efektywności regionalnych portów lotniczych w Polsce; studium porównawcze”; http://www.transportation.overview.pwr.edu.pl/UPLOAD/BAZA-ARTYKULOW/PL/2012/02/A_PL_12_02_05.pdf.
20. S Jyothi Prasad Reddy, Asia Pac paper on Airport Energy Efficiency and Management., ACI, 2014
21. International Civil Aviation Organization (ICAO). Aerodrome Design and Operations, 5th ed.; ICAO: Montreal, QC, Canada, 2009
22. Uysal MP, Sogut MZ, An integrated research for architecture-based energy management in sustainable airports. Energy 140:1387–1397, 2017
23. Sergio Ortega and Mario Manana, Energy Research in Airports: A Review; 2016
24. Wróbel Piotr, Architektura Pasażerskich Terminali Lotniczych; Krakowska Akademia im. Andrzeja Frycza Modrzewskiego.. ISBN 978-83-7571-244-5.

25. Renewable Energy for Aviation: Practical Applications to achieve carbon reductions and cost savings. https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO_UNDP_GEF_RenewableEnergyGuidance.pdf.
26. Practical guide for implementing an energy management system. United Nations Industrial Development Organization, Vienna; UNIDO (2015) <https://open.unido.org/api/documents/4784090/download/The%20UNIDO%20Programme%20on%20Energy%20Management%20System%20Implementation%20in%20Industry>
27. ISO (International Organization for Standardization) (2011) ISO 50001 energy management systems requirements with guidance for use. ISO Central Secretariat, Geneva
28. Ortega, S.; Manana, M. Characterisation and Analysis of Energy Demand Patterns in Airports. *Energies* 2017. file:///C:/Users/Dariusz%20C5%81ukowski/Downloads/energies-10-00119%20(2).pdf.
29. Rehault, N.; Ohr, F.; Maier, R. Online Survey on European Airports Energy Operation. Project Cascade European FP7. Available online: <http://www.cascade-eu.org/cms/index.php?id=publications>
30. <https://cordis.europa.eu/article/id/93078-cascade-reducing-energy-use-by-airports/pl>
31. Europejski Zielony Ład ; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52019DC0640>
32. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics
33. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_production,_consumption_and_market_overview#Market_shares;
34. A focus on the production of renewable energy at the Airport Site. Eco Airport Toolkit; ICAO; <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Energy%20at%20Airports.pdf>;
35. Lee, S.H.; Kim, D.H.; Kim, J.H.; Lee, G.S.; Park, J.G. Effect of metal-reflection and surface-roughness properties on power-conversion efficiency for polymer photovoltaic cells. *J. Phys. Chem. C* 2009
36. FAA. 1989. Airport Design. FAA Advisory Circular 150/5300-13
37. Teohen P. Shea, Evaluation of Glare Potential for Photovoltaic Installations, August 2012; <http://www.suniva.com/documents/Suniva%20Reflection%20and%20Glare%20Report%20-%20Marketing%20-%20August%202012.pdf>
38. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2015. Renewable Energy as an Airport Revenue Source. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22139>. Str. 58-59
39. Viessmann. Energetyka słoneczna – Zeszyty Fachowe 2012
40. Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports; FAA; April 2018, https://www.appropedia.org/Technical_Guidance_for_Evaluating_Selected_Solar_Technologies_on_Airports#Physical_penetration_of_airspace
41. Sukumaran Sreenath, Kumarasamy Sudhakar, Ahmad Fitri Yusop; Airport-based photovoltaic applications 19 February 2020; https://www.researchgate.net/publication/340039714_Airport-based_photovoltaic_applications
42. Taesoo D. Lee, Abasifreke u. Ebong, Przeglądy energii odnawialnej i zrównoważonej. Przegląd technologii cienkowarstwowych ogniw słonecznych i wyzwań, Tom 70, kwiecień 2017; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211631070X>
43. GS Energia, <http://www.gsfolowoltaika.pl/fotowoltaika/mapa-naslonecznienia-polski/>
44. EU energy in figures, Statistical Pocketbook 2020 <file:///C:/Users/Dariusz/Downloads/MJAB20001ENN.en.pdf>.
45. W. Jaskółowski and J. Wiatr, “Instalacje fotowoltaiczne. Podstawy fizyczne działania. Ochrona odgromowa. Zasady neutralizacji zagrożeń porażenia prądem elektrycznym w czasie pożaru,” *Zesz. Nauk. SGSP / Szk. Główna Służby Pożarniczej*, vol. Nr 59 (3), no. 59, 2016.
46. Sarniak M.T., Budowa i eksploatacja systemów fotowoltaicznych. *Medium* 2015

47. Parfianowicz Kamil. Wpływ usytuowania oraz warunków środowiskowych na moc uzyskiwaną z instalacji fotowoltaicznej. Przewodnik Projektanta wyd. 4/2020
<https://inzynerbudownictwa.pl/instalacja-fotowoltaiczna-od-a-do-z/>
48. DeVault, T.L.; Seamans, T.W.; Schmidt, J.A.; Belant, J.L.; Blackwell, B.F.; Mooers, N.; Tyson, L.A.; Pelt, L.V. Bird, Use of solar photovoltaic installations at US airports: Implications for aviation safety. Landsc. Urban Plan. 2014
49. Wiśniewski G., Michałowska-Knap K., Dziamski P., Oniszk-Popławska A., Regulski P., Wizja rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce do 2020, Instytut Energetyki Odnawialnej, PSEW, Warszawa 2009
50. Segmented Morphing Ultralight Rotor (SUMR) Project, National Renewable Energy Laboratory, US.
<https://engineering.virginia.edu/fril/projects/segmented-ultralight-morphing-rotor>
51. Radziejewicz W. Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne turbin wiatrowych małej mocy. Politechnika Opolska. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe Nr 1/2015 (105)
52. Aleksandra Głuchowska; Energia Wiatrowa w Architekturze; Politechnika Krakowska; Kraków 2019
53. Dilimulati Aierken, Stathopoulos Ted, Paraschivoiu Marius, Wind turbine design for urban applications: A case study if shrouded diffuser casing for turbines, "Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics", Vol. 175, 2018.
54. Korab. R. Energia odnawialna. Mikroelektrownie wiatrowe w systemach zasilania budynków. Politechnika śląska. Nr ref EIM: EIM05141
55. Grzegorz Wiśniewski, Prezes Instytutu Energetyki Odnawialnej, Dlaczego energetyka wiatrowa w jednych krajach się rozwija , a w innych nie. <https://cire.pl/item,213745,13,0,0,0,0,0,dlaczego-energetyka-wiatrowa-w-jednych-krajach-sie-rozwija-a-w-innych-nie-.html>.
56. Baworski A, Garbala K, Czech P, Witaszek K. Ocena możliwości wykorzystania pędu mas powietrza od jadących pojazdów do napędu turbiny wiatrowej. Wydawnictwo Naukowe Politechniki Śląskiej Series Transport. 2015, 88, 5-17. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2015.88.1
57. Karolewski Bogusław . "Obliczanie parametrów małej elektrowni wiatrowej". elktro.info 6/2014;
<https://www.elektro.info.pl/artukul/napedy-i-sterowanie/57677,obliczanie-parametrow-malej-elektrowni-wiatrowej>
58. ICAO, A focus on the production of renewable energy at the Airport site. ECO AIRPORT TOOLKIT. Case studies. https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ecoairports/Final%20Energy_at_Airports_Case_Studies.pdf
59. Renewable Energy for Aviation. Practical applications to achieve carbon reductions and cost savings. www.icao.int/.../Documents/ICAO_UNDP_GEF_RenewableEnergyGuidance.pdf
60. Demusiak G. Otrzymywanie paliwa wodorowego metodą reformowania gazu ziemnego dla ogniów paliwowych małej mocy. Instytut Nafty i Gazu. Oddział Warszawa, październik 2012
[.http://archiwum.inig.pl/INST/nafta-gaz/nafta-gaz/Nafta-Gaz-2012-10-02.pdf](http://archiwum.inig.pl/INST/nafta-gaz/nafta-gaz/Nafta-Gaz-2012-10-02.pdf)
61. Małek A. Wendeker M. Ogniwa paliwowe typu PEM teoria i praktyka. Politechnika Lubelska. Lublin 2010. ISBN: 978-83-62596-08-9
62. Fuel Cell & Hydrogen Association. Fuel Cell Basics. <https://www.fchea.org/fuelcells>
63. Pitts Larry. Fuel Cell Powered Airport Ground Support Equipment MT011; Plug Power Inc. June 13, 2018 .https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review18/mt011_pitts_2018_p.pdf
64. Sandrine Carlier, Ayce Celike, Nicolas Duchene, Frank Jelinek. IGAES project: Potential Benefits of Fuel Cell Usage in the Aviation Context. EEC/SEE/2006/004
https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/library/034_Benefits_of_Fuel_Cell_Usage.pdf
65. Spiegel Jan Ellen. Fuel Cells: Promising, but struggling to catch on. November 21, 2016. Yale Climate Connections; <https://yaleclimatemediaforum.org/2016/11/fuel-cells-pros-and-cons/>
66. The Financial Decision-Makers Guide to Energy-as-a-Service Microgrids. Microgrid Knowledge. Schneider Electric, Alfa Structure
67. Heard R. Mannarino E. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2018. Microgrids and Their Application for Airports and Public Transit. Washington, DC: The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/25233>

68. J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011
69. Szczerbowski R. Ceran B. Możliwości i perspektywy magazynowania energii w generacji rozproszonej. Politechnika Poznańska. Logistyka 4/2014
70. Herlender K. Magazynowanie energii w systemach generacji rozproszonej. Politechnika Wroclawska, Instytut Elektroenergetyki. VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012
71. Thornton R. Lotnisko Atlanta demonstruje zapotrzebowanie na mikro sieci do skojarzonego ogrzewania i zasilania (CHP). <https://www.districtenergy.org/blogs/robert-thornton/2017/12/19/atlanta-airport-demonstrates-need-for-combined-hea>
72. Ionita, C.; Marinescu, M. A review of combined heat and power generation. *Sci. Bull. Ser. D Mech. Eng.* 2002, 64
73. <https://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-cogeneration/press/press-releases/cogeneration-at-duesseldorf-international-airport-reliable-energy-for-the-future/>
74. <https://www.wartsila.com/media/news/23-02-2005-24-mw-cogeneration-plant-for-milan-airport>;
75. The contribution of sustainable energy sources to the resilience of military energy supply and operational effectiveness, Political Committee, AC/119-N(2021)0011
76. Vytautas Kerssilis, Strategy options for installation of modern energy technologies into military bases, NATO Energy Security Centre of Excellence, Energy Security: Operational Highlights, No 2, 2013
77. David Schill, Improving Energy Security for Air Force Installations, https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/rgs_dissertations/RGSD300/RGSD361/RAND_RGSD361.pdf
78. United States Air Force 2008 Infrastructure Energy Strategic Plan, Office of the Air Force Civil Engineer
79. Air Force Energy Flight Plan 2017-2036, Air Force Civil Engineer Center <https://www.afcec.af.mil/Portals/17/documents/Energy/AFEnergyFlightPlan2017.pdf?ver=2019-12-16-105948-090>
80. Powering the Department of Defense, Initiatives to Increase Resiliency and Energy Security, American Security Project, <https://www.americansecurityproject.org/wp-content/uploads/2017/09/Ref-0204-Powering-the-DoD.pdf>
81. <https://us.sunpower.com/sites/default/files/media-library/case-studies/cs-nellis-air-force-base-builds-largest-solar-photovoltaic-power-plant-north-america-sunpower.pdf>
82. Kanika Malik. (2017). Assessment of energy consumption pattern and energy conservation potential at Indian airports. *Journal of Construction in Developing Countries*, 22(Supp. 1): <https://doi.org/10.21315/jcdc2017.22.suppl.6>
83. Ziemiński Stanisław, Metody śledzenie przepływów w sieciach elektroenergetycznych w zastosowaniu do analiz techniczno-ekonomicznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008
84. Wang, S.; Yan, C.; Xiao, F. Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. *Energy Build.* 2012, 55, 873–888
85. Khosravani, H.R.; Castilla, M.D.M.; Berenguel, M.; Ruano, A.E.; Ferreira, P.M. A Comparison of Energy Consumption Prediction Models Based on Neural Networks of a Bioclimatic Building. *Energies* 2016, 9, 57. <https://doi.org/10.3390/en9010057>
86. A. Almalaq and J. J. Zhang, "Evolutionary Deep Learning-Based Energy Consumption Prediction for Buildings," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 1520-1531, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2887023.
87. Ossowski S. Sieci neuronowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994
88. Rutkowska Danuta, Piliński Maciej, Rutkowski Leszek, Sieci neuronowe, algorytmy genetyczna i systemy rozmyte, PWN, Warszawa-Łódź 1997

89. Chi Dung Doan, Shie_yui Liong: Generalization for Multilayer Neural Network Bayesian Regularization or Early Stopping. Academia, Accelerating the world's research. Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore -119260
90. Murat Kayri, Predictive Abilities of Bayesian Regularization and Levenberg–Marquardt Algorithms in Artificial Neural Networks: A Comparative Empirical Study on Social Data, Dep. Of Computer Engineering, Mus Aparslan University, Turkey, Mathematical and Computational Applications, 24 May 2016
https://www.researchgate.net/publication/303522181_Predictive_Abilities_of_Bayesian_Regularization_and_Levenberg-Marquardt_Algorithms_in_Artificial_Neural_Networks_A_Comparative_Empirical_Study_on_Social_Data