

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA
I ENERGETYKI

Rozprawa doktorska

gen. dyw. mgr inż. Dariusz Łukowski

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

Pod kierunkiem

Prof. dr hab. inż. Andrzeja Frąckowiaka

POZNAŃ 2021

Spis treści

WSTĘP	4
Teza pracy.....	6
Cel pracy.....	7
Przedstawienie problemu naukowego	8
1 CHARAKTERYSTYKA CYWILNEGO PORTU LOTNICZEGO	20
1.1 Czynniki decydujące o zużyciu energii elektrycznej w cywilnych portach lotniczych	23
1.2 Metody poprawy efektywności energetycznej cywilnych portów lotniczych. ..	28
1.2.1 Redukcja zapotrzebowania na energię.....	31
1.2.2 Konstrukcja systemu zarządzania i nadzoru	33
1.2.3 Wykorzystanie alternatywnych źródeł energii w portach lotniczych.	42
1.3 Wykorzystanie energii słonecznej w portach lotniczych	46
1.4 Wykorzystanie energii wiatrowej w portach lotniczych	59
1.5 Zastosowanie energii wodnej w portach lotniczych	70
1.6 Zastosowanie energii geotermalnej w portach lotniczych	72
1.7 Zastosowanie biomasy jako źródła energii w portach lotniczych	74
1.8 Wykorzystanie ogniw wodorowych do zasilania portów lotniczych.	76
1.9 Zastosowanie mikrosieci w portach lotniczych.	83
1.10 Wykorzystanie kogeneracji i trigeneracji w cywilnym porcie lotniczym.	89
2 CHARAKTERYSTYKA WOJSKOWEJ BAZY LOTNICZEJ	91
2.1 Cechy wojskowej infrastruktury lotniczej i systemu zarządzania energią w Polsce	91
2.2 Możliwości zastosowania rozwiązań wykorzystywanych w cywilnych portach lotniczych dla wojskowych baz lotniczych	96
3 MODEL BUDOWY PROFILU ENERGETYCZEGO W PORTACH LOTNICZYCH	103
3.1 Identyfikacja profilu energetycznego	103
3.2 Prognozowanie zużycia energii	106

4 PREDYKCJA ZUŻYCIA ENERGII Z WYKORZYSTANIEM PAKIETU PROGRAMOWEGO MATLAB NA PRZYKŁADZIE CYWILNEGO PORTU LOTNICZEGO	114
4.1 Przyjęte założenia dla budowanego modelu	114
4.2 Wyniki przeprowadzonych badań	118
5 MOŻLIWOŚĆ ADAPTACJI ZAPROPONOWANYCH ROZWIĄZAŃ W SIŁACH ZBROJNYCH	135
ABSTRACT.....	139
ZAŁĄCZNIK 1 TABELA ZAGREGOWANYCH DANYCH DLA PORTU LOTNICZEGO SAN FRANCISCO	140
ZAŁĄCZNIK 2 LINIA KOMEND WYKORZYSTANA W BADANIU SIECI NEURONOWEJ Z WYKORZYSTANIEM MATLAB.....	142
BIBLIOGRAFIA WEDŁUG KOLEJNOŚCI CYTOWANIA.	147

Wstęp

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, związanych z brakiem mocy lub stanem sieci przesyłowych i dystrybucyjnych, czy też zakłóceń wynikających z celowych działań takich jak sabotaż lub cyberatak, 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 zoptymalizowania oraz w maksymalnym stopniu uniezależnienia tego typu instalacji wojskowych od zewnętrznych źródeł energii. Prace w tym obszarze podjęły kilkanaście lat temu SZ 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

¹ Energy of installations – energia stałej infrastruktury

² Net Zero Installation – Instalacje samowystarczalne

proporcji między 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. Niniejszy dezyderat inicjuje jako pierwszy podejście do zagadnienia optymalizacji zasilania energetycznego baz lotniczych przy pomocy zaawansowanych narzędzi służących do aproksymacji potrzeb oraz analizy możliwości zastosowania alternatywnych źródeł energii odnawialnej. 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 energetycznej w cywilnych portach lotniczych, które przy uwzględnieniu istotnych różnic między instalacjami wojskowymi a cywilnymi pozwolą wskazać rozwiązanie możliwe do wykorzystania w Siłach Zbrojnych.

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>

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.

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. Aproxymacja 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.

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 odcięcia 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). Jak narzędzie obliczeniowe wykorzystano pakiet bibliotek Neural Network Toolbox wykonany przez amerykańską firmę Math-Works dla programu Matlab.

Przedstawienie problemu naukowego

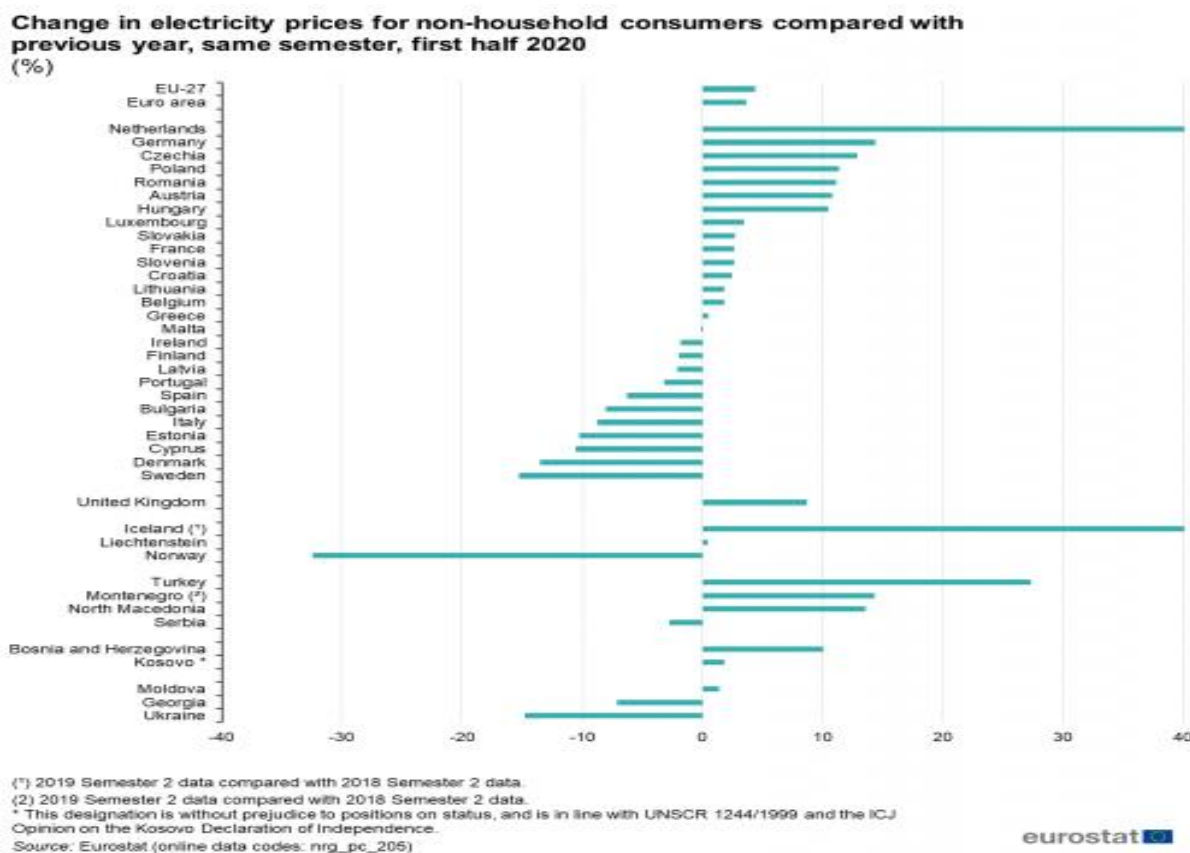
Zużycie energii elektrycznej zwłaszcza przez bazy lotnicze do tej pory nie stanowiło przedmiotu głębszych analiz i badań poza bieżącą uproszczoną analizą zapotrzebowania na moc czynną, bierną i szczytową w celu właściwej reakcji na zdiagnozowane zjawiska np. przekroczenia mocy umownej, doboru układów kompensujących moc bierną indukcyjną i pojemnościową, czy też doboru jak najlepszej taryfy.

Jako instalacje o dużym znaczeniu dla systemu obronnego powinny one cechować się dużą odpornością na wiele czynników zewnętrznych, które mogą ograniczyć zdolność lub całkowicie uniemożliwić wykonywanie nałożonych zadań. Najbardziej powszechnym źródłem zasilania stosowanym na lotniskach jest energia elektryczna oraz paliwa takie jak gaz ziemny, benzyna, olej napędowy, czy propan butan używany w kotłach cieplnych, usługach gastronomicznych, kogeneracyjnych źródłach energii, generatorach zasilania awaryjnego, urządzeniach lotniskowych i pojazdach różnego typu. W niniejszym dezyderacie skupiono się jedynie na aspekcie zasilania w energię elektryczną. Baza lotnicza SZ jest typowym, pozornie nie różniącym się od innych odbiorcą energii za pośrednictwem sieci dystrybucyjnej, należącej do cywilnego operatora zewnętrznego. W tym kontekście wszelkie zakłócenia ze strony dystrybutora mogą mieć wpływ na jakość tych kluczowych dla systemu obronnego instalacji.

Blisko 25% mocy wytwórczej w Polsce pochodzi z elektrowni mających ponad 40 lat, w których aż 60% bloków jest starsza niż 30 lat. Oznacza to, że nawet przy zastosowaniu wszystkich możliwości modernizacyjnych i wykorzystaniu działających dzisiaj elektrowni przez maksymalnie dopuszczalny czas (szacowany na 50 lat), do roku 2030 wymianie musi ulec około połowy obecnej infrastruktury produkcyjnej w sektorze, a do roku 2040 nawet 80%.⁵ Istnieje więc zagrożenie związane z zabezpieczeniem potrzeb, ale również znaczącego wzrostu cen energii ze względu na wzrastającą presję modernizacyjną. Rys. 1 pokazuje zmiany cen

⁵ Stan i potrzeby rozwojowe sieci elektroenergetycznych w procesie transformacji niskoemisyjnej w Polsce. Europejski Instytut Miedzi; Wiesław Nowak, Waldemar Szypra, dr inż. Rafał Tarko; styczeń 2017r.

energii elektrycznej według Eurostatu⁶ dla odbiorców niebędących gospodarstwami domowymi w porównaniu z analogicznym półroczem



Rys. 1 Zmiana cen energii elektrycznej dla odbiorców niebędących gospodarstwami domowymi w porównaniu z analogicznym półroczem poprzedniego roku, pierwsza połowa 2020 r

poprzedniego roku, dla pierwszej połowy 2020 r. Jak widać, do pierwszej połowy 2020 r. ceny te spadły w dwunastu państwach członkowskich UE. Wzrosły one w piętnastu pozostałych, a w Polsce odnotowano wzrost cen energii na poziomie 11,4%.

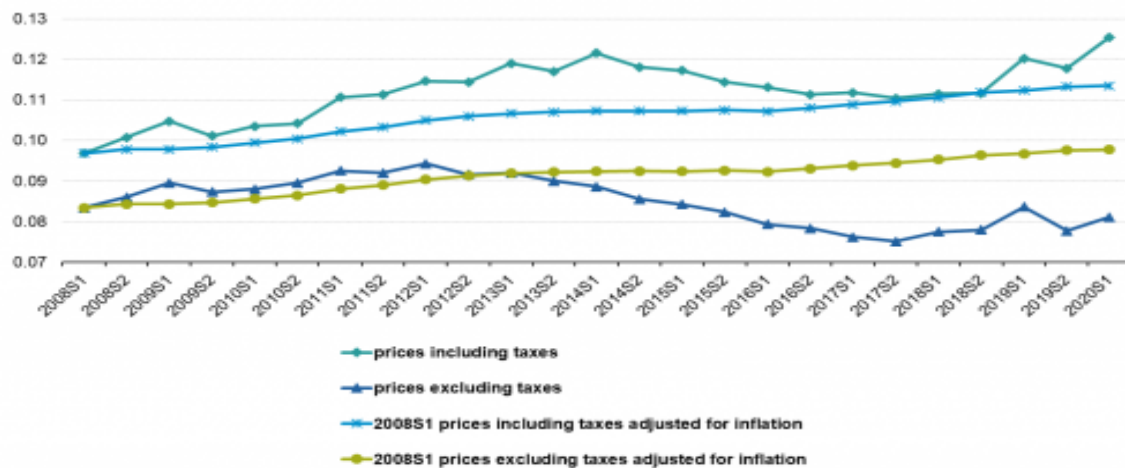
Jeśli spojrzymy na zmiany cen energii elektrycznej dla tych samych odbiorców w UE (rys. 2) to zauważymy, że w latach 2008-2020 cena netto wzrastała proporcjonalnie do inflacji, a nawet uległa obniżeniu w 2019 r. Należy jednak zwrócić uwagę na wagę podatków, która stale rosła z 13,8% w pierwszej połowie 2008 r. do 35,3% w pierwszej połowie 2020 r. Główną przyczyną wzrostu

⁶ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_non-household_consumers, (dostęp: 25.03.2021).

opłat są wprowadzone opłaty emisyjne oraz inwestycje w nową infrastrukturę, w tym związaną z wdrażaniem energii odnawialnej. Polska znajduje się w grupie państw UE o stosunkowo wysokim poziomie opodatkowania energii co pokazuje rys. 3.

Development of electricity prices for non-household consumers, EU-27, 2008-2020

(EUR per kWh)

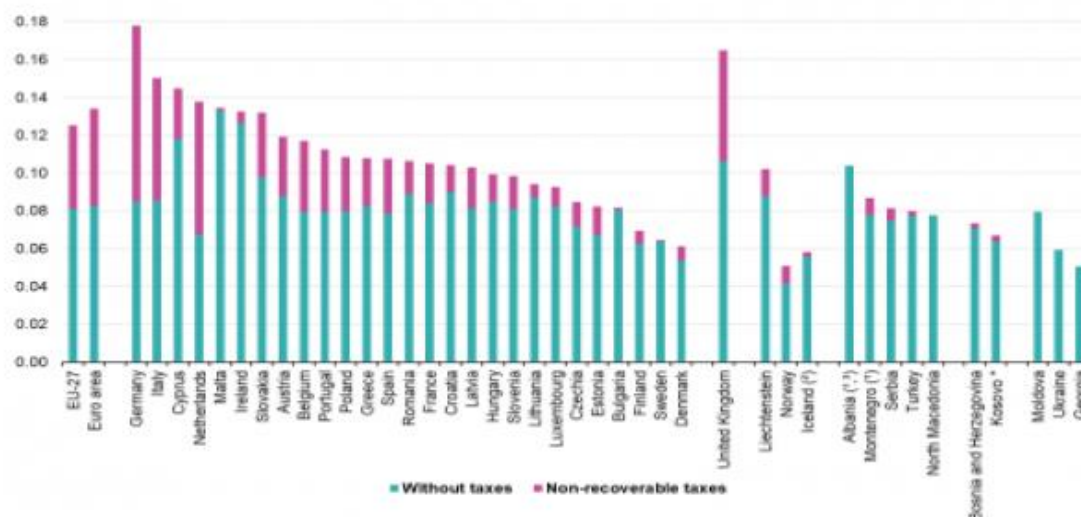


Source: Eurostat (online data codes: nrg_pc_205)

eurostat

Rys. 2 Rozwój cen energii elektrycznej dla odbiorców innych niż gospodarstwa domowe w latach 2008-2020 (EUR za kWh)

Electricity prices for non-household consumers, first half 2020
(EUR per kWh)



(¹) 2019 Semester 1 data.

(²) 2019 Semester 2 data.

(³) estimation.

* This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo Declaration of Independence.

Source: Eurostat (online data codes: nrg_pc_205)

eurostat

Rys. 3 Ceny energii elektrycznej dla odbiorców innych niż gospodarstwa domowe, pierwsza połowa 2020 r. (Euro za kWh)

Systemy przesyłowe (wysokich i najwyższych napięć) oraz sieci dystrybucyjne (średnich i niskich napięć) to głównie linie napowietrzne o znacznie większej wrażliwości na oddziaływanie czynników zewnętrznych niż kable podziemne. Ponad 70% infrastruktury przesyłowej w Polsce wybudowano ponad 25 lat temu. Obok modernizacji sieci wytwórczej i przesyłowo-dystrybucyjnej coraz większego znaczenia nabierają projekty związane z zastosowaniem rozwiązań typu SMART. Obejmują one między innymi budowanie mikrosieci przemysłowych (*smart grids*), inteligentnego opomiarowania (*smart metering*), jak i zaawansowane systemy sterowania sieciami elektroenergetycznymi. Inteligentne liczniki energii elektrycznej, które zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej 2009/72/WE z dnia 13 lipca 2009 r. stanowią część tak zwanego trzeciego pakietu klimatycznego i do końca 2020 roku powinny funkcjonować u 80% europejskich odbiorców energii elektrycznej. Dotyczy to również Polski. Metody oszczędzania energii można oprzeć o dwie metody: redukcję kosztów energii (rodzaj energii, odpowiednio dobrana taryfa) oraz wydajność energetyczną, czyli redukcję zużycia energii w przeliczeniu na jednostkę produktu, procesu, oczekiwanego efektu. Istnieją różne metody i techniki na obniżanie zużycia energii: audyt energetyczny, benchmarking energetyczny, zarządzanie energią, wydajność energetyczna, oszczędność energii, dostosowywanie taryf i kompensacja mocy biernej. W ujęciu biznesowym można wymienić pięć powodów, dla których warto zarządzać energią i wydajnością energetyczną. Ekonomia, czynniki napędzające biznes, zarządzanie produkcją, ochrona środowiska i przewaga konkurencyjna⁷.

W przypadku organizacji niekomercyjnej wygląda to nieco inaczej. Baza lotnicza, w tym Siły Zbrojne, są odbiorcą nietypowym. Nie jest ona podmiotem gospodarczym (w sensie produkcyjnym). Opłaty za energię nie są powiązane z wypracowanym zyskiem, odpowiednim zarządzaniem procesami produkcyjnymi i efektywnością procesów wytwórczych. Niemniej jednak efektem “pracy” takiej instalacji jest zdolność do zabezpieczenia wszystkich potrzeb

⁷ Kit Oung Zarządzanie energią w przedsiębiorstwie PWN SA Warszawa 2015 r.

lotnictwa zgodnie z obowiązującym regulaminem lotów⁸ i instrukcją organizacji lotów⁹, w tym zabezpieczenia bezpieczeństwa lotów oraz utrzymania i przygotowania statków powietrznych w gotowości do użycia, ale najważniejsza funkcja to zapewnienie ciągłości działań lotnictwa w warunkach zagrożenia wojennego i wojny. W tym modelu przyjęto, że krytyczne jest zapewnienie zestawu zdolności, a nie konieczne analiza kosztów energii elektrycznej zużywanej w tym celu. Odbywa się to jednak bez pełnej analizy ryzyka związanego z utratą zasilania. W pracy zastanowimy się czy takie podejście jest właściwe. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że nie. Po pierwsze stanowi to zagrożenie dla wykonania zadań. Po drugie przepisy prawa nakładają wymagania związane z ochroną środowiska, a siły zbrojne jako dość znaczny konsument energii elektrycznej, płacący z publicznych pieniędzy rachunki za energię w kwocie około 250 mln zł rocznie ma wpływ na środowisko w jakim żyjemy i powinien uważnie analizować sposób wydawania pieniędzy z budżetu państwa. Po trzecie poprzez właściwą politykę energetyczną instalacje wojskowe mogą ograniczyć koszty funkcjonowania i przeznaczyć wygosparowane środki na zakup nowoczesnych platform bojowych, a także zwiększyć zdolność do zapewnienia ciągłości działań niezależnie od czynników zewnętrznych, których liczba rośnie. Te nowe kwantyfikatory to działania hybrydowe lub ataki podejmowane w cyberprzestrzeni. Faktem jest, że Siły Zbrojne RP, wzorem innych państw NATO, w swoich dokumentach doktrynalnych nie zdefiniowały pojęcia bezpieczeństwa energetycznego, stąd też w ramach osiągniętych celów i zadań trudno jest znaleźć właściwe odniesienia. Obecne systemy rezerwowe baz lotniczych, oparte głównie na agregatach prądotwórczych, są zdolne zabezpieczyć jedynie krótkotrwałe przerwy w dostawach energii, a cyberatak może być wykonany z wykorzystaniem sieci przesyłowo-dystrybucyjnej. Zasilanie awaryjne oparte na generatorach prądu ma też wiele poważnych wad. Niewłaściwa eksploatacja i diagnostyka może ograniczać ich bezawaryjność, a w związku

⁸ *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 r.

⁹ *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 r.

z tym, że nie są one połączone w sieć, nie stanowią one wzajemnie rezerwy gorącej¹⁰ w przypadku awarii.

Najbardziej zaawansowane we wdrażaniu koncepcji bezpieczeństwa energetycznego są Siły Zbrojne USA. Do końca 2025 r. Amerykanie przewidują rozbudowę zdolności do wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych do poziomu 3 GW rocznie, co ma stanowić 25% wszystkich źródeł energetycznych.¹¹ Wszystkie bazy sił powietrznych objęte są programem NET ZERO INSTALLATION i do końca 2030 roku będą spełniały wymagania w zakresie bezpieczeństwa energetycznego, przy jednoczesnej optymalizacji i zachowaniu niezbędnych proporcji między zasilaniem zewnętrznym oraz produkcją energii ze źródeł własnych, a wysunięte bazy operacyjne będą zdolne do funkcjonowania wyłącznie na odnawialnych źródłach energii. Założono, że bazy lotnicze sił powietrznych do końca 2020 r. powinny wytwarzać 1 GW energii pozyskiwanej z paneli fotowoltaicznych. Narzucono obligatoryjne wyposażenie wszystkich instalacji wojskowych w inteligentne mikrosieci.

Podejmowanie działań związanych z właściwym zarządzaniem energetycznym ma przynieść oprócz efektów w sferze bezpieczeństwa, szereg innych zalet. Dla przykładu poznanie własnego profilu obciążenia, przy jednoczesnym wprowadzeniu dynamicznych cen za energię elektryczną, miałyby podwójną korzyść. Zmniejszyłoby koszty funkcjonowania odbiorcy, a jednocześnie takie działania na poziomie znacznej grupy odbiorców zmniejszyłoby potrzeby, czy też presję na przeprowadzenie szerokiej i kosztownej modernizacji całego systemu elektroenergetycznego po stronie dostawców.

Zbudowanie skutecznego systemu zarządzania energią jest działaniem organizacyjno-technicznym. Realizacja tego typu przedsięwzięć w przedsiębiorstwach może spowodować oszczędności energii na poziomie od 5%

¹⁰ Rezerwa gorąca – inaczej forma nadmiaru np. strukturalnego, funkcjonalnego lub parametrycznego (system równoległy, przystosowany do pełnienia dodatkowych funkcji lub utrzymujący więcej możliwości niż przeciętne potrzeby) - Jerzy Jaźwiński, Krystyna Ważyńska-Fiok, Bezpieczeństwo systemów, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1993, str. 39-40

¹¹ Sierra Hicks, "Powering the Department of Defense Initiatives to Increase Resiliency and Energy Security" American Security Project, wrzesień 2017

do 30%, przy czasie zwrotu z inwestycji nawet do 2 lat¹². Do jego realizacji niezbędne jest wdrożenie normy ISO 50001, czyli międzynarodowego standardu zarządzania energią, który określa ramy dla poprawy efektywności energetycznej. Z doświadczeń Krajowej Agencji Poszanowania Energii (KAPE)¹³ wynika, że szacunkowy potencjał zysków z podjęcia działań proefektywnościowych w przedsiębiorstwie można przedstawić w następujący sposób:

- etap I - opracowanie, wdrożenie lub usprawnienie systemu zarządzania energią oraz wzmocnienie procesu kontroli operacji technologicznych - 11,2 % oszczędności;
- etap II - zastosowanie dodatkowego opomiarowania i wdrożenie systemów eksploatacji - 9,5%;
- etap III - zmiany w liniach technologicznych i w układach pomocniczych - 9,8%.

W przedstawionej pracy zakłada się, że zyski po stronie instalacji wojskowych mogłyby być nie niższe niż w typowych przedsiębiorstwach.

Istotnym zagadnieniem w tych rozważaniach jest określenie efektywności energetycznej (EE) bazy lotniczej. Dostępne opracowania nie określają wskaźników efektywności energetycznej dla tego typu instalacji. Jedyne dostępne opracowania dotyczą cywilnych portów lotniczych, których funkcjonowanie jest oceniane nieco innymi parametrami, ponieważ są one zasadniczo przeznaczone do transportu pasażerskiego i/lub pełnią funkcję olbrzymich hubów logistycznych. Nie można wykorzystać w tym przypadku powszechnie stosowanej metody benchmarkingu, polegającej na porównaniu uzyskanych wyników w innych, podobnych obiektach. Tego typu dane uznawane są za wrażliwe i nie podlegają rozpowszechnianiu. Typowe lotnisko składa się z części związanej bezpośrednio z wykonywaniem lotów statków powietrznych oraz obsługą pasażerów. Ta pierwsza obejmuje systemy radionawigacyjne, wieżę kontroli lotów, oświetlenie

¹² 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, s. 1-4

¹³ Zarządzanie Energią – Praktyczne Aspekty Obniżenia Kosztów Funkcjonowania Przedsiębiorstwa; <https://www.bialecertyfikaty.com.pl/artykuly/zarzadzanie-energi-praktyczne-aspekty-obnizenia-kosztow-funkcjonowania-przedsiębiorstwa/>, wejście 13.12.2020

miejsce postojowych dla samolotów, oświetlenie pasów startowych, hangary do obsługi samolotów, strażnice przeciwpożarowe, czy też stacje meteorologiczne. Druga obejmuje terminale pasażerskie i parkingi. Długość pasów startowych, ścieżek kołowania i kubatura hangarów technicznych determinują zużycie energii. W cywilnych portach lotniczych największy udział w konsumpcji energii elektrycznej mają jednak terminale pasażerskie. W ramach terminali dominuje energia niezbędna do ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji obiektu (HVAC - heating, ventilation and air conditioning)¹⁴. W tym przypadku najlepiej efektywność energetyczną można określić jako stosunek ilości obsłużonych pasażerów do zużytej na ten cel energii. W przypadku baz lotniczych udział poszczególnych elementów infrastruktury lotniska w konsumpcji energii jest inny i może nie być wprost zależny od wykonywanych operacji lotniczych, ze względu na specyficzne wymagania w zakresie utrzymywania niezbędnych systemów w ciągłej gotowości do działań, niezależnie od tego czy są one prowadzone, czy też nie. Odpowiedź na to pytanie dadzą obliczenia efektywności energetycznej bazy stanowiącej stosunek wykonywanych operacji lotniczych do zużytej energii przez instalację:

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

gdzie: Z – ilość przeprowadzonych operacji lotniczych w czasie t ;

E_b – energia zużyta przez bazę lotniczą w czasie t .

Przedmiotem rozważań będą następujące czynniki warunkujące stopień zużycia energii elektrycznej w standardowej wojskowej bazie lotniczej:

- wielkość bazy lotniczej;
- rozproszenie elementów infrastruktury/kompleksów;
- położenie geograficzne (warunki klimatyczne);

¹⁴ T.Hikmet Karakoc; C.Ozgur Colpan; Onder Altuntas; Yasin Sohret, *Sustainable Aviation*, Springer Nature Switzerland AG 2019

- konstrukcja obiektów (technologia wykonania, zwłaszcza właściwości izolacyjne);
- sposób zarządzania energią (opomiarowanie, struktura organizacyjna, wiedza i świadomość);
- stosowane źródła zasilania;
- liczba operacji lotniczych;
- poziom wykonywanych prac obsługowo-naprawczych;
- stopień nowoczesności obiektu (zastosowane technologie do zabezpieczenia statków powietrznych i zabezpieczenia lotów);
- utrzymanie w sprawności maszyn, urządzeń i obiektów.

Czynniki te zostaną porównane z charakterystykami cywilnych portów lotniczych, definiując podstawowe różnice i cechy wspólne, także powszechnie zidentyfikowane czynniki i procesy wpływające na poprawę ich efektywności energetycznej. Bazy lotnicze to przede wszystkim uporządkowany system obiektów infrastruktury pozwalający na wykonywanie zadań lotniczych zgodnie z przeznaczeniem. Predykcja zużycia energii elektrycznej dla infrastruktury stacjonarnej była przedmiotem wielu badań¹⁵. Jest to zagadnienie złożone ze względu na wiele czynników zewnętrznych, takich jak warunki klimatyczne, konstrukcja obiektów, właściwości termiczne użytych do budowy materiałów, czy też po prostu zachowanie się użytkowników. W przypadku warunków klimatycznych ogromne znaczenie mają takie parametry jak dobowe, czy sezonowe wahania temperatur, wilgotność powietrza, siła i kierunek wiatru. W przypadku obiektów budowlanych, oprócz właściwości zastosowanych materiałów, znaczenie ma ich wielkość, położenie względem wiatru i słońca, grubość i konstrukcja dachu.

¹⁵ Perez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. A review on buildings energy consumption information. *Energy Build.* 2008

Zhao, H.-X.; Magoules, F. A review on the prediction of building energy consumption. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012

Fumo, N. A review on the basics of building energy estimation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014;

Ahmad, A.S.; Hassan, M.Y.; Abdullah, M.P.; Rahman, H.A.; Hussin, F.; Abdullah, H.; Saidur, R. A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014

Metody predykcji zużycia energii przez obiekty budowlane można podzielić na statyczne, inżynieryjne i te wykorzystujące sztuczną inteligencję. Metoda inżynieryjna jest najbardziej złożona i wymaga bardzo rozległej wiedzy eksperckiej¹⁶. Metody statystyczne wykorzystują dane historyczne w celu powiązania energii ze zmiennymi mającymi największy wpływ na jej zużycie jako dane wejściowe. W odróżnieniu od metody inżynierskiej, metody statystyczne dostarczają modele o mniejszej liczbie zmiennych i bez większego fizycznego zrozumienia procesów¹⁷. W ostatnich latach najbardziej rozpowszechnioną metodą predykcji dla zagadnień związanych z konsumpcją energii stały się metody wykorzystujące sztuczną inteligencję, takie jak sieci neuronowe (neural networks), maszyny wektorów nośnych (support vector machines) i logika rozmyta (fuzzy logic). Podobnie jak w przypadku metod statystycznych, metody sztucznej inteligencji wykorzystują dane historyczne odzwierciedlające zachowanie modelowanego procesu. Sieci neuronowe wykazały wysoką zdolność do uchwycenia złożonych nieliniowych relacji między wektorami danych wejściowych i wyjściowych. W związku z tym, że procesy zużycia energii charakteryzują się nieliniowością, największe zastosowanie w tym obszarze mają właśnie te metody. Przewaga sieci neuronowych w prognozowaniu polega nie tylko na lepszej jakości predykcji, ale również na stosunkowo prostej i łatwej do przeprowadzenia analizie opartej na kojarzeniu danych wejściowych (czynników wpływających na prognozę) z danymi wyjściowymi (dane prognozowane) bez jawnej relacji między nimi przy dużej elastyczności w samym doborze czynników wpływających na prognozę. W praktyce do celów predykcyjnych wykorzystuje się najczęściej sieci neuronowe typu perceptron wielowarstwowy, sieć typu Kohonena, sieć rekurencyjną oraz sieć typu Hechta-Nielsena, stanowiącą połączenie sieci Grossberga z siecią Kohonena¹⁸.

¹⁶ Mena, R.; Rodríguez, F.; Castilla, M.; Arahal, M.R. A prediction model based on neural networks for the energy consumption of a bioclimatic building. *Energy Build.* 2014

¹⁷ 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

¹⁸ Piotr Helt, Mirosław Parol, Paweł Piotrowski, *Metody sztucznej inteligencji. Przykłady zastosowań w elektroenergetyce.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012: str. 83

Dla przyjętej na potrzeby dezyderatu struktury bazy lotniczej niezbędne jest zdefiniowanie modelu regresyjnego i przeprowadzenie analiz na podstawie danych historycznych określających możliwość predykcji zużycia energii elektrycznej przy pomocy wybranego narzędzia. Wykorzystując w badaniach sieci neuronowe typu perceptron wielowarstwowy z regułami uczenia nadzorowanego, ustalimy, czy przy obecnej, mocno ograniczonej strukturze danych pozyskiwanych na poziomie bazy lotniczej, możliwe jest prognozowanie zużycia, jakim błędem jest ono obarczone i jakiego rodzaju przedsięwzięcia należy zrealizować, aby uzyskać najlepsze efekty predykcji. Analiza danych energetycznych może być wykonana dla różnych interwałów czasowych. Wykorzystywany w bazach lotniczych Sił Powietrznych system opomiarowania i nadzoru pozwala na gromadzenie danych w interwale miesięcznym, co może wpłynąć na możliwość wytrenowania zbudowanego modelu sieci oraz dokładność wygenerowanej predykcji. Jako narzędzie obliczeniowe wykorzystano biblioteki *Neural Network Toolbox* programu Matlab firmy Math-Works

Ze względu na brak dostępu do danych rzeczywistych do realizacji obliczeń, wykorzystane zostaną dane z cywilnego portu lotniczego, przy założeniu, że odczyty pobierane są w interwale miesięcznym, a dane meteorologiczne dla wytypowanej instalacji mogą być pozyskane ze źródeł satelitarnych NASA (*NASA Prediction of Worldwide Energy Resources - NASA POWER*) z lat 2013-2019 dla dowolnie wybranych obszarów geograficznej lokalizacji portu lotniczego. Produkty satelitarne NASA oparte na modelach są wystarczająco dokładne do zapewnienia danych o zasobach słonecznych i meteorologicznych w regionach, w których pomiary powierzchniowe są rzadkie lub nie istnieją. Dodatkowo, dane te zapewniają ciągłość w wybranym przedziale czasu. Na potrzeby tego dezyderatu wykorzystano „archiwum energii odnawialnej” powszechnie wykorzystywane do projektowania tego typu systemów zasilanych energią słoneczną i wiatrową.

Przeprowadzone symulacje na wytypowanym modelu odpowiedzą na pytania związane z niezbędnymi kierunkami zmian w systemie energetycznym baz, co do: zmian w systemie zarządzania energią, znaczenia audytu

energetycznego (w tym modeli zdalnych, automatycznych, cyberodpornych) oraz oczekiwań i korzyści wynikających z nowego podejścia do kwestii efektywności energetycznej w Siłach Zbrojnych. Ponadto pozwolą na zbadanie w jakim zakresie, wykorzystując odnawialne źródła energii (w pracy skoncentrowano się na wykorzystaniu energii słonecznej i wiatrowej) i efektywniej zarządzając jej zużyciem, można zminimalizować lub uniezależnić wykonywanie krytycznych misji przez bazy lotnicze od źródeł zewnętrznych budując zaawansowane inteligentne mikrosieci¹⁹. Jest to również doskonała okazja do zbadania możliwości wykorzystania istniejących zaawansowanych cywilnych rozwiązań na infrastrukturze obronnej lub do rozwinięcia jeszcze bardziej zaawansowanych technologii. Rozważając zastosowanie fotowoltaiki i energii wiatrowej na lotniskach, uwzględniono również oddziaływanie tych instalacji na urządzenia lotniskowe i statki powietrzne. Szczególnie zwrócono uwagę na możliwy negatywny wpływ na radary, urządzenia łączności, nawigacji i rozpoznania działające w podczerwieni. Nie do przyjęcia jest również tworzenie fizycznych barier w rejonie lotniska o dużym znaczeniu dla bezpieczeństwa prowadzonych działań lotniczych.

Poddano również weryfikacji strukturę zarządzania energetycznego w Siłach Zbrojnych na poziomie zarządcy, administratora i użytkownika infrastruktury w kontekście możliwości budowy i wdrożenia efektywnego zarządzania energią, w sposób umożliwiający realizację tych zadań na wzór i podobieństwo do rozwiązań stosowanych w lotnictwie cywilnym.

Na podstawie uzyskanych danych wygenerowane zostaną wnioski dla systemu zarządzania energią bazy lotniczej z wykorzystaniem zaproponowanego modelu strategii zużycia energii.

¹⁹ Mikrosieć (microgrid) (na podstawie E. Hayden, "Introduction To Microgrids," Secur. Rep., 2013)- jest to w pełni autonomiczna wydzielona część sieci elektroenergetycznej. Może funkcjonować w zakresie średniego i niskiego napięcia. Autonomia sieci microgrid przejawia się w zakresie dystrybucji i korzystania z zasobów energetyki zawodowej lub własnej. Główne cechy mikrosieci to: własne źródła energii; systemy magazynowania energii; odbiorca końcowy energii; układy sterujące, zabezpieczające i nadzorcze; urządzenia dopasowujące i sprzęgające mikrosieć z główną siecią systemową

1 CHARAKTERYSTYKA CYWILNEGO PORTU LOTNICZEGO

Lotnisko jest złożoną strukturą, składającą się z budowli inżynierskich, urządzeń zapewniających obsługę operacji lotniczych statków powietrznych oraz z budynków obsługi. Zgodnie z definicją zawartą w Prawie lotniczym jest to „(...) wydzielony obszar na lądzie, wodzie lub innej powierzchni w całości lub w części przeznaczony do wykonywania startów, lądowań i naziemnego ruchu statków powietrznych wraz ze znajdującymi się w jego granicach obiektami i urządzeniami budowlanymi o charakterze trwałym, wpisany do rejestru lotnisk”²⁰.

Cywilne porty lotnicze są podmiotami gospodarczymi, które konkurując na rynku komercyjnym muszą dbać o wskaźniki ekonomiczne decydujące o efektywności ich funkcjonowania. Historycznie powstały one na początku XXw. w wyniku transformacji instalacji wojskowych powstałych podczas I i II Wojny Światowej do celów obronnych, w lotniska służące do celów cywilnych. Stopniowo ich struktura i wyposażenie ulegały zmianom w odpowiedzi na zmiany zachodzące w dziedzinie transportu lotniczego. Dzisiaj podmioty te w ocenie swojej działalności posługują się szeregiem wskaźników uwzględniających cele biznesowe. Podstawowe parametry charakteryzujące cywilne porty lotnicze dotyczą liczby obsłużonych pasażerów, przepływu ładunków, czy też ilości i obsłużonych lotów. Intensywny rozwój lotnictwa spowodował znaczną rozbudowę infrastruktury naziemnej, w tym terminali pasażerskich, cargo, systemów obsługi bagaży, systemów bezpieczeństwa, nawigacji, radarów i łączności. Zwiększyła się liczba lotnisk oraz nastąpił wzrost intensywności operacji lotniczych na ziemi, jak i w powietrzu. Rosnąca konkurencja w pozyskiwaniu operatorów linii lotniczych powoduje konieczność obniżania opłat lotniskowych, a co za tym idzie poszukiwania oszczędności gdzie indziej, przy jednoczesnym stałym podnoszeniu standardu obsługi oraz poszukiwaniu dodatkowych źródeł dochodu. Rozwija się cała sieć usług towarzyszących takich

²⁰ Prawo lotnicze, art. 2 ust. 4, Dz. U. 2006 Nr 100, poz. 696 z późn. zm.

jak: handel towarami w strefach lotniska, usługi gastronomiczne, kulturalne (kina), wypoczynkowe (odnowa biologiczna), czy wypożyczenia pojazdów. Powoduje to dalszą rozbudowę infrastruktury i rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną. Aby mieć możliwość rozwijania nowych zdolności, potrzebne są środki na inwestycje, najlepiej aby pochodziły z części wypracowanych zysków.

Porty lotnicze starając się zredukować zatrudnienie i wdrażając najnowocześniejsze rozwiązania technologiczne wyręczają człowieka w wielu procesach. Te zjawiska dodatkowo konsumują energię, której koszty stają się istotnym elementem wpływającym na wypracowany efekt ekonomiczny. Biorąc pod uwagę rosnącą presję na czynniki związane z ochroną środowiska, w tym na emisję gazów cieplarnianych, czy też produkcję i sposób utylizacji odpadów, zagadnienie budowy efektywnego zarządzania energią stało się faktem. Analiza portów lotniczych w Stanach Zjednoczonych pokazuje, że energia stanowi drugi, największy składnik kosztów funkcjonowania po wydatkach związanych z zatrudnieniem personelu²¹. Według innej klasyfikacji, opartej na badaniach 24 europejskich portów lotniczych, energia stanowi 12% ogólnych wydatków po wynagrodzeniach wraz z pochodnymi (42%) i kosztach kapitałowych (22%)²².

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.

Według Eurostatu w Unii Europejskiej funkcjonuje około 500 cywilnych portów lotniczych. Obecnie lotnictwo cywilne odpowiada za około 2% produkcji gazów cieplarnianych, a do 2050 r. może to być nawet 16%²³. Skupiając się na porcie lotniczym należy zaznaczyć, że największą część energii pochłania infrastruktura. Obiekty stałe odpowiadają za około 20 do 40% konsumpcji energii

²¹ ACRP. 2007. Research Results Digest 2: Model for Improving Energy Use in U.S.

Airport Facilities. Research conducted by the Energy Systems Laboratory, Texas A&M University.

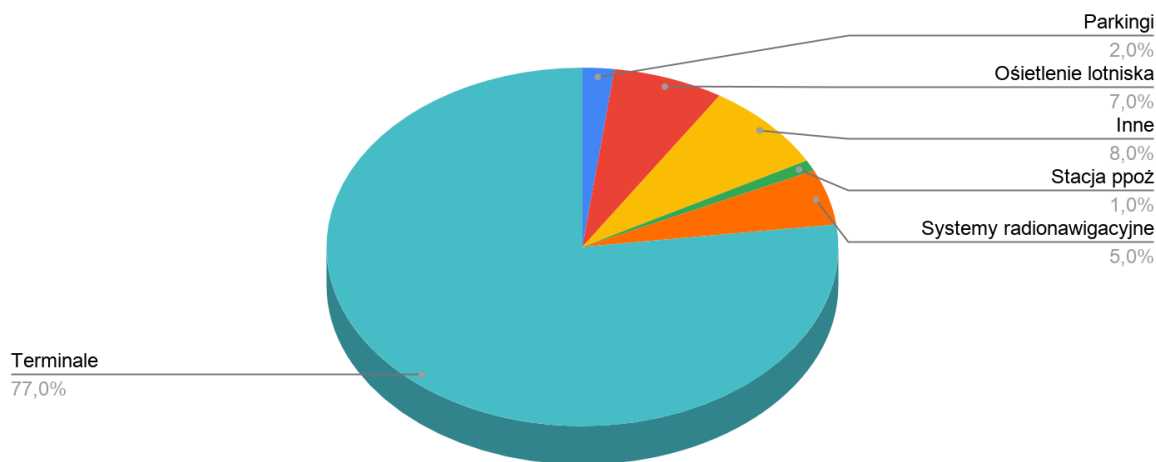
²² Sławomir Kalinowski "Analiza wskaźnikowa efektywności regionalnych portów lotniczych w Polsce; studium porównawcze"; http://www.transportation.overview.pwr.edu.pl/UPLOAD/BAZA-ARTYKULOW/PL/2012/02/A_PL_12_02_05.pdf; wejście 07.04.2021

²³ ACI Asia Pac paper on Airport Energy Efficiency and Management. S Jyothi Prasad Reddy; 2014

na świecie²⁴ (w zależności od stopnia rozwoju kraju). Aby uporządkować strukturę transportu lotniczego, Międzynarodowa Organizacja Lotnictwa Cywilnego (ICAO)²⁵ wydała rekomendacje i standardy techniczne dotyczące organizacji cywilnych portów lotniczych, które zostały uznane przez władze lotnicze na całym świecie²⁶. Tradycyjnie port lotniczy składa się z części lądowej odpowiadającej za obsługę pasażera i część powietrzną związaną 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

(HVAC²⁷), systemy oświetleniowe, informacyjne i łączności (ICT²⁸). Rozkład energii ilustrują rys. 4 i 5²⁹



Rys. 4 Typowy podział zużycia energii na lotnisku

²⁴Pérez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. A review on buildings energy consumption information. Energy Build. 2008, 40, 394–398.

²⁵ ICAO - International Civil Aviation Organization

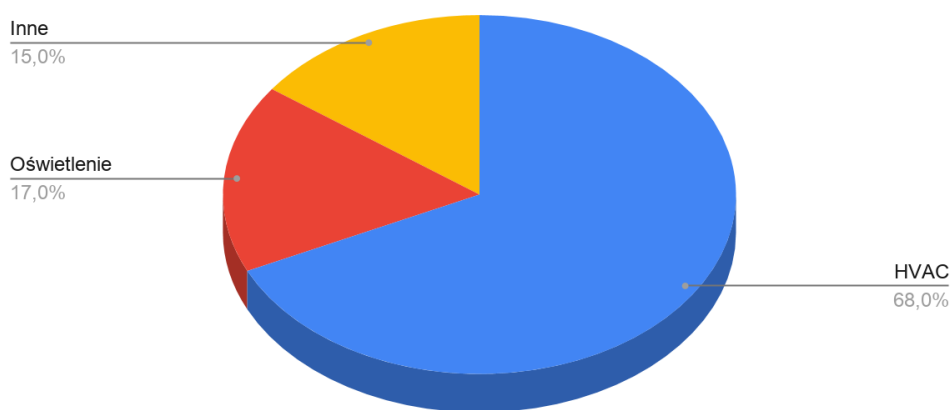
²⁶ International Civil Aviation Organization (ICAO). Aerodrome Design and Operations, 5th ed.; ICAO: Montreal, QC, Canada, 2009

²⁷ HVAC - Heating Ventilation Air Conditioning

²⁸ ITC - Information and Communications Technologies

²⁹ Uysal MP, Sogut MZ (2017) An integrated research for architecture-based energy management in sustainable airports. Energy 140:1387–1397

Należy podkreślić, że proporcje te mogą ulegać zmianie ze względu na wielkość lotniska. W miarę jak rosną gabaryty lotniska, wzrasta też znaczenie terminalu pasażerskiego; od budynku zapewniającego niezbędne minimum obsługi, spełniającego podstawowe wymagania, aż do pozycji dominującej, jaką terminal osiąga na największych lotniskach. W małym porcie lotniczym ilość energii do zabezpieczenia funkcjonowania terminalu pasażerskiego będzie mniejsza, a w dużych może dochodzić do 80% ogólnego zapotrzebowania na energię całej infrastruktury i co za tym idzie proporcje w zużyciu energii między częścią lotniczą a lądową będą ulegały zmianom.



Rys. 5 Typowe zużycie energii w terminalach lotniskowych

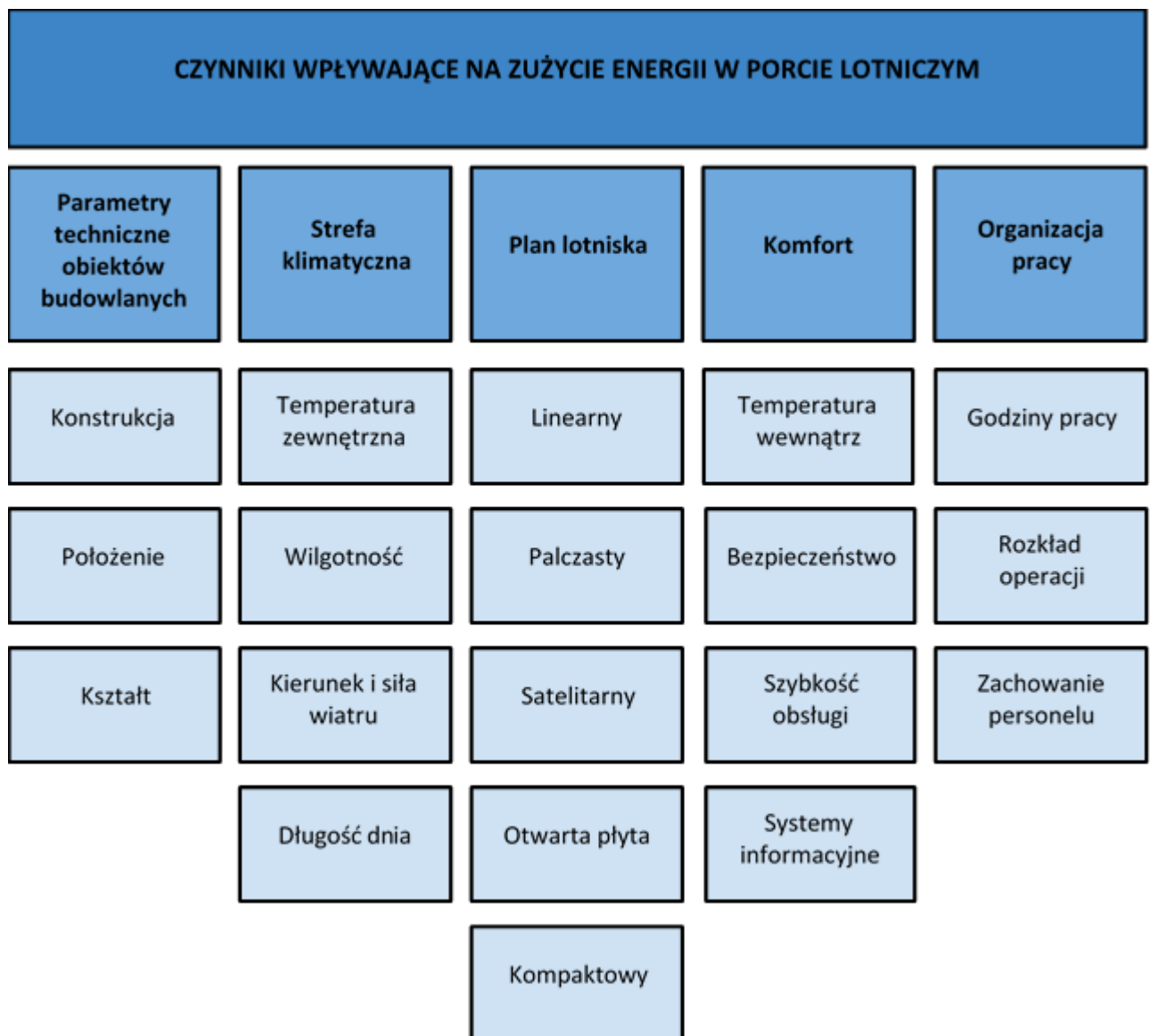
1.1 Czynniki decydujące o zużyciu energii elektrycznej w cywilnych portach lotniczych

Analizy zużycia energii przez cywilne porty lotnicze wskazują, że charakterystyki te są stochastyczne, nieliniowe i bardzo dynamiczne³⁰. Zależą one od wielu czynników. W przypadku infrastruktury zabezpieczającej ruch lotniczy zużycie energii zależy od: powierzchni lotniska, w tym liczby i parametrów pasów startowych, dróg kołowania, godzin w jakich lotnisko wykonuje operacje lotnicze

³⁰ 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.

(oświetlenie lotniska) oraz pracy wszystkich urządzeń radionawigacyjnych, a także obiektów i urządzeń zapewniających ochronę przeciwpożarową, czy też tankowanie samolotów.

W przypadku części lądowej, jak wspomniano wcześniej, najwięcej energii zużywają terminale lub inne obiekty infrastruktury stałej odpowiedzialne za transfer pasażerów lub ładunków. Podział czynników wpływających na zużycie energii ilustruje rys. 6.



Rys. 6 Czynniki wpływające na zużycie energii elektrycznej w cywilnym porcie lotniczym (opracowanie własne)

Zużycie energii w tym przypadku zależy między innymi od następujących czynników³¹:

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

Odpowiednia konstrukcja budynków ma zasadnicze znaczenie dla uzyskiwanych parametrów energetycznych. Zależą one od takich czynników jak ustawienie budynku względem stron świata, przyjęcie odpowiedniego kształtu, ustawienie względem najczęściej występujących wiatrów, zacienienie, konstrukcja ścian, okien i dachu, odpowiednio zaprojektowanych powierzchni chłodzących, grzewczych i doświetlających. Dobór tych parametrów uzależniony jest zawsze od przeznaczenia budynku lub jego części. Inne parametry będą wymagane dla pomieszczeń biurowych, handlowych lub magazynowych. Dla przykładu w terminalach pasażerskich najczęściej stosuje się system ścian osłonowych ze szkła oraz szklanych świetlików w dachach. Zaletą jest możliwość wnikania naturalnego światła w głąb obiektu. Zastosowanie regulowanych przesłon jest wykorzystywane do kontroli temperatury wewnątrz zależnie od nasilenia promieniowania słonecznego. Szeroko wykorzystywane jest ogrzewanie lub chłodzenie podłóg przy pomocy systemów radiacyjnych. Stosowane jest również szkło o niskiej transmisji termalnej, stosowanie odbłaskowych pokryć ścian i dachów, konstrukcja o pasywnej charakterystyce solarnej.

Architektura lotniska może przyjąć rozmaite formy. Terminale mogą tworzyć zwartą zabudowę, mogą mieć strukturę palczastą, mogą być oddzielone lub oddalone znacznie od siebie.

W literaturze przedmiotu rozróżnia się następujące typy konfiguracji terminali w planie³²:

³¹ Sergio Ortega and Mario Manana, *Energy Research in Airports: A Review*; 2016

³² Wróbel Piotr *Architektura Pasażerskich Terminali Lotniczych*; Krakowska Akademia im. Andrzeja Frycza Modrzewskiego.. ISBN 978-83-7571-244-5, str. 209-211

- linearny (linear), np. Heathrow T4, Monachium T1 i T2, Singapur T2;
- pirs palczasty (pier/finger), np. Heathrow T3, Amsterdam Schiphol, Bangkok, Zurich;
- satelitarny (satelite), np. Atlanta, Denver, Paryż-Roissy T1, Tokio Narita T2, Heathrow T5;
- otwarta płyta (open apron), np. Waszyngton Dulles, Montreal Mirabel;
- kompaktowe moduły jednostek terminalowych (compact module unit terminal), np. Paryż-Roissy, moduł A,B,C,D; Dallas Forth Worth, Hanover, Budapeszt.

W ostatnich latach, przy projektowaniu nowych obiektów widoczny jest ruch w kierunku wielkich scentralizowanych terminali, za którymi przemawiają korzyści wynikające z ekonomii, możliwości aplikacji kompaktowych jednorodnych systemów operacyjnych, systemowej organizacji instalacji budynkowych, elastyczności przestrzennej oraz podatności na przebudowy i rozbudowy. Modularność i prefabrykacja dodatkowo sprzyjają szybkiej realizacji i obniżeniu kosztów

Położenie w określonej strefie klimatycznej lotnisk związane jest z takimi czynnikami jak zmienność długości dnia w zależności od pory roku (inne nasświetlenie), temperatury zewnętrznej, wilgotności, kierunku i siły wiatru. Parametry te w zdecydowany sposób wpływają na zapotrzebowanie energetyczne zwłaszcza terminali lotniskowych. Od tego zależy dobór systemów ogrzewania lub chłodzenia dla konkretnej instalacji. Niska temperatura i silny wiatr wymagają większej izolacji termicznej i skutecznego ogrzewania. Strefa gorąca i wilgotna wymaga dobrych systemów wentylacji i chłodzenia. Z tego powodu normy budowlane dla obiektów budowlanych w poszczególnych państwach są zróżnicowane. Dla przykładu systemy ogrzewania w Danii są konstruowane tak, aby rozpoczynały pracę przy spadku temperatury zewnętrznej do 17⁰ C lub niższej, w przypadku Wielkiej Brytanii jest to 15,5⁰ C³³.

³³ 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; wejście 02.04.2021

Każdy port lotniczy przyjmuje swoją strategię w zakresie poziomu, czy standardu oferowanych usług i warunków, w jakich odbywają podróże pasażerowie podczas transferu przez terminale lotniskowe. Istotne są czasy obsługi biletowo-bagażowej, kontroli bezpieczeństwa, kontroli przejść granicznych i tranzytu. Skrócenie tych czasów oznacza potrzebę rozbudowy terminala do poziomu utrzymującego zakładaną przepustowość przy jednocześnie komfortowym czasie realizacji wszystkich usług. Wiąże się z tym znaczne zwiększenie liczby maszyn i urządzeń wspierających obsługę, czy też systemów informacyjnych. Ważne jest utrzymanie komfortowych warunków temperaturowych, stałych niezależnie od wahań parametrów zewnętrznych. Łatwość i szybkość przemieszczania się wewnątrz terminali i między nimi, oznacza rozbudowę systemów ruchomych chodników, schodów i środków transportu. Wiele elementów wyposażenia jest konsekwencją obowiązujących przepisów transportu powietrznego, które muszą być spełnione przez projektantów i inwestorów.

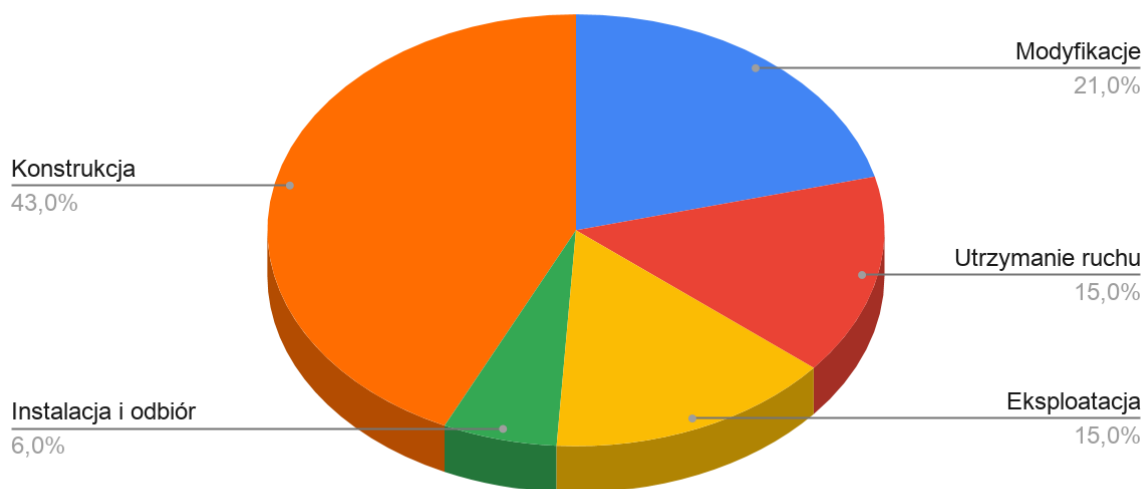
Sposób organizacji pracy obiektów wpływa bezpośrednio na zapotrzebowanie energetyczne. Decydujące są tutaj godziny, w jakich port wykonuje operacje lotnicze. Jeśli całą dobę to wszystkie urządzenia w części lotniczej i lądowej pracują ze zwiększoną wydajnością (np. dodatkowe oświetlenie w porze nocnej). Rozkład lotów determinuje ich intensywność, a tym samym liczbę pasażerów korzystających z terminali, a co za tym idzie wielkość personelu do zabezpieczenia wszystkich niezbędnych usług. Loty nieplanowe mogą wprowadzać zakłócenia do systemu.

Przytoczone czynniki zapewne nie wyczerpują wszystkich zjawisk i uwarunkowań wpływających na zapotrzebowanie energetyczne w cywilnych portach lotniczych, ale pokazują, że analiza tych zjawisk jest wysoce złożona.

1.2 Metody poprawy efektywności energetycznej cywilnych portów lotniczych

Zużywana energia elektryczna stanowi kluczowy element kosztów każdego przedsiębiorstwa i jest istotnym czynnikiem funkcjonowania portu lotniczego. Zagadnienie związane z efektywnością energetyczną staje się głównym elementem strategii rozwoju przedsiębiorstw również branży lotniczej.

Z zasady tylko około 40% braku wydajności energetycznej wynika bezpośrednio z niewłaściwej konstrukcji infrastruktury przedsiębiorstw. Rys. 7 pokazuje podział przyczyn braku wydajności na poszczególne grupy, z którego wynika, że w przybliżeniu 60% braku wydajności można poddać kontroli i zarządzaniu oraz zminimalizować³⁴.



Rys. 7 Klasyfikacja przyczyn braku wydajności³⁴

Działania zmierzające do poprawy efektywności energetycznej wynikają nie tylko z potrzeby poprawy wskaźników ekonomicznych. Należy pamiętać, że porty lotnicze to miejsca, przez które przewijają się pasażerowie z różnych

³⁴ Kit Oung Zarządzanie energią w przedsiębiorstwie PWN SA Warszawa 2015 r. str. 27

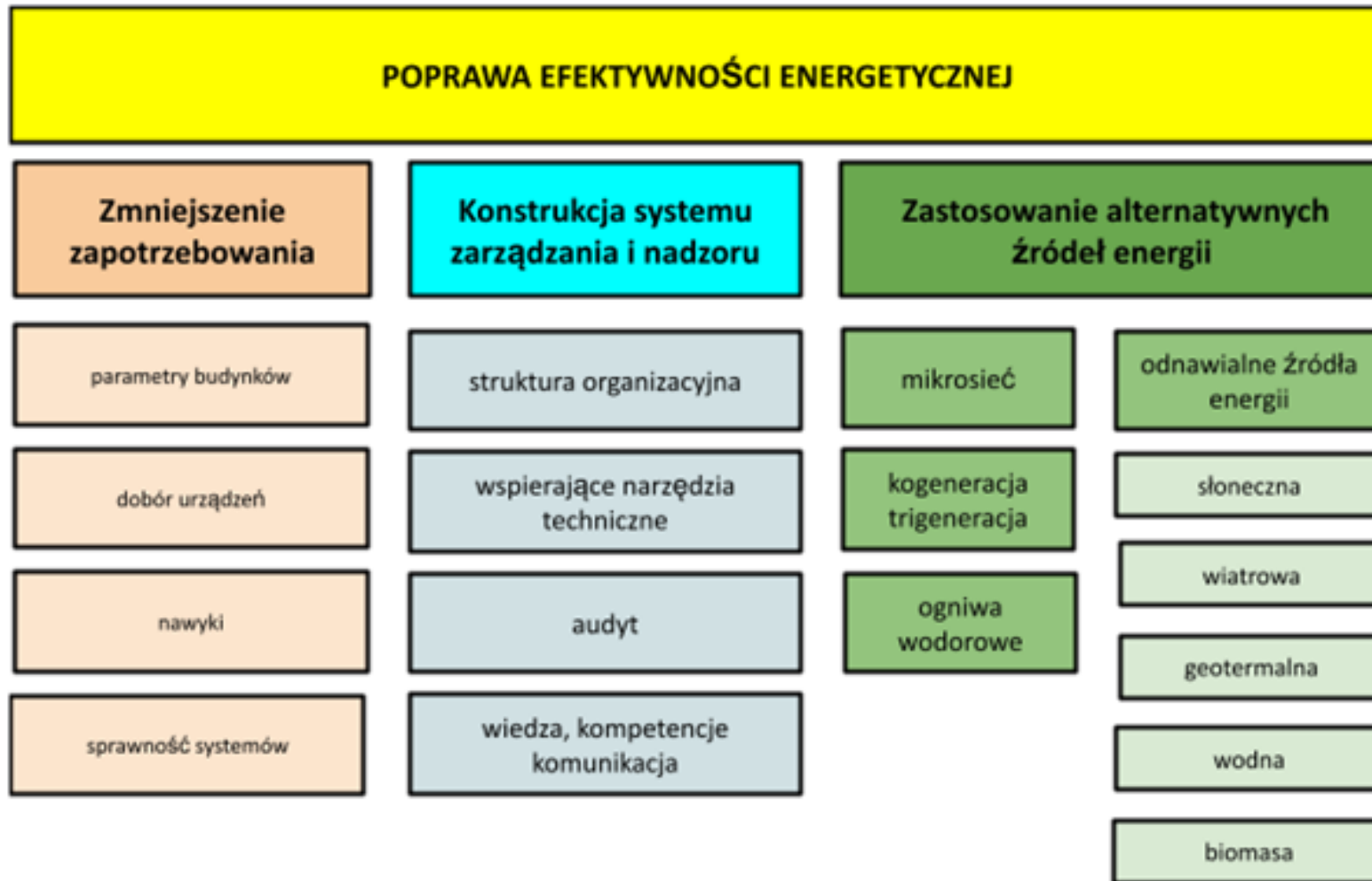
zakątków świata i stanowią również znakomite miejsce na promowanie nowoczesności i innowacyjności państwa oraz jego strategii w zakresie podejścia do zagadnień ochrony środowiska. Dla przybyszów drogą powietrzną jest to miejsce, gdzie kształtowane jest pierwsze wrażenie dotyczące poziomu rozwoju danego kraju.

Rosnąca świadomość w zakresie potrzeby ochrony środowiska przyczynia się do wprowadzania coraz bardziej wyśrubowanych norm. Dbłość o środowisko to również kwestia wizerunkowa dla firm w tym dla portów lotniczych. Zarządzający tymi podmiotami są pod coraz większą presją oszczędzania energii i redukcji emisji dwutlenku węgla, przy jednoczesnym zmniejszaniu zapotrzebowania na zakup limitów emisyjnych.

Ta świadomość spowodowała uruchomienie przez Międzynarodowe Zgromadzenie Portów Lotniczych w Europie (ACI EUROPE) programu zarządzania emisjami CO₂ pod nazwą Airport Carbon Accreditation. W Europie do programu przystąpiło 116 portów lotniczych.³⁵

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 (rys. 8).

³⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Airport_Carbon_Accreditation, . wejście 25.03.2021



Rys. 8 Metody poprawy efektywności energetycznej portów lotniczych (opracowanie własne)

Przyjęta strategia zależy od nakreślonych celów, które mogą obejmować:

- redukcję emisji;
- poprawę wyniku finansowego;
- zapewnienie stabilności pracy instalacji;

Może też łączyć w sobie wszystkie wymienione wyżej elementy.

1.2.1 Redukcja zapotrzebowania na energię

Zmniejszenie zapotrzebowania na energię wydaje się najbardziej naturalną strategią. Koncentruje się ona na tych zadaniach, które w bezpośredni sposób mogą zredukować potrzeby.

Porty lotnicze już na etapie projektowania bardzo uważnie podchodzą do wydajności energetycznej planowanych budynków. Biorąc pod uwagę uwarunkowania konstrukcyjne, uwzględniając specyficzne przeznaczenie tworzy się zależność wyjściową w stosunku do przewidywanych efektów redukcji zapotrzebowania na energię. Ważne jest, aby dążąc do zwiększenia efektywności energetycznej zachować właściwy balans pomiędzy komfortem i bezpieczeństwem użytkowników a uzyskaną oszczędnością.

Na etapie budowy lotniska w ramach procesu projektowania należy tak dobrać konstrukcję budynków, aby uwzględnić wszystkie te czynniki, które wcześniej zostały opisane jako wpływające na wydajność energetyczną obiektów. W przypadku obiektów istniejących można je zmodernizować w celu poprawy tych parametrów, poprzez poprawę izolacji, szczelności, systemów wentylacji, pokryć, czy zastosowanie instalacji grzewczych, chłodzących i wentylacyjnych o wyższej sprawności.

Do tej grupy zadań należy również zaliczyć właściwy dobór parametrów i urządzeń stanowiących wyposażenie lub zapewniających prowadzenie zaplanowanych procesów na przykład dobór elektrycznych silników napędowych o jak najwyższym poziomie sprawności i mocy odpowiadającej potrzebom systemu, czy też pomp stosowanych w systemach wodnych albo wentylatorów w systemach wentylacji. Jak wcześniej wskazano najwięcej energii do (80% energii terminali) pochłaniają właśnie systemy ogrzewania, chłodzenia i wentylacji. Konstrukcja tych systemów, ich sprawność i efektywność decyduje o kosztach energii.

Redukcję zużycia energii można również uzyskać poprzez właściwą eksploatację urządzeń. Utrzymywanie ich w stałej sprawności poprzez regularne obsługi zabiegi konserwacyjne i naprawy ma tutaj ogromne znaczenie. Uszkodzenie lub nieprawidłowa praca jednego z elementów systemu powoduje jego rozregulowanie i pracę pozostałych poza nominalnymi zakresami. Zasilanie lub napędzanie urządzeń niesprawnych generuje straty.

Innym czynnikiem jest właściwy dobór oświetlenia obiektów, co stanowi drugi z najbardziej widocznych kosztów energetycznych w cywilnych portach lotniczych. Wykorzystując zarówno rozwiązania architektoniczne oparte na świetle naturalnym i jasnych, odbijających światło pokryciach wewnątrz, jak i rozwiązania techniczne polegające na zastosowaniu najnowocześniejszych rozwiązań generujących światło sztuczne można uzyskać ogromne oszczędności. W celu redukcji kosztów energii w tym obszarze szeroko stosuje się systemy detekcji ruchu w miejscach mniej uczęszczanych, doświetlania i gaszenia świateł w poszczególnych bramkach i częściach terminala zgodnie z rozkładem lotów oraz intensywnością ruchu. Wykorzystuje się regulatory oświetlenia, bardziej wydajne źródła, w tym oświetlenie w technice diodowej LED. W przypadku oświetlenia pasów startowych zastosowanie LED nie jest oczywiste ze względu na przepisy bezpieczeństwa lotów. W tym przypadku bardziej koncentruje się wysiłek na oszczędzaniu w wyniku zwiększenia efektywności lamp oświetleniowych spełniających restrykcyjne przepisy w zakresie ich skuteczności świetlnej.

Wreszcie sposób organizacji pracy obiektu lotniskowego poprzez dobranie obciążeń do wykonywanych operacji (na przykład godziny pracy lotniska, zarządzanie strumieniem pasażerów) oraz wyrobione nawyki personelu związane z oszczędzaniem energii (wyłączanie urządzeń zbędnych w realizacji zadań), w istotny sposób poprawiają efektywność wykorzystania energii.

Na przykład właściwe wykorzystanie światła dziennego i wyłączanie zbędnego oświetlenia, gdy jest widno, pozwoliło na zaoszczędzenie 80% energii zużywanej na oświetlenie portu lotniczego Bangalore w Indiach. Międzynarodowy port lotniczy Armenii posiada dach w 40% powierzchni wykonany ze szkła odbijającego bezpośrednio promieniowanie słoneczne, redukując przenikanie temperatury, ale skutecznie oświetlając terminal. Port lotniczy w Honolulu jest skonstruowany w sposób

umożliwiający naturalną wentylację między listopadem, a kwietniem redukując zapotrzebowanie na klimatyzację i wentylację mechaniczną. Wymiana 40 tys. świateł na LED w porcie lotniczym Hong Kong w 2012 r. oraz 100 tys. podświetleń tablic informacyjnych na LED przyniosła oszczędność około 15 mln kWh³⁶. Znaczne efekty w zakresie ograniczenia nagrzewania się terminali lotniczych można uzyskać poprzez pokrywanie dachów materiałami o wysokim albedo³⁷ lub naturalną roślinnością.

1.2.2 Konstrukcja systemu zarządzania i nadzoru

Drugą istotną grupą przedsięwzięć decydujących o poprawie efektywności energetycznej portów lotniczych jest system 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 obejmuje realizację czterech etapów: planowania, wykonania, sprawdzenia i poprawiania³⁸. Często używa się określenia koło PDCA (Plan-Do-Check-Act).

Zarządzanie energią uznawane jest za najbardziej efektywny sposób walki z jej marnotrawstwem. Uznaje się, że dzięki wdrożeniu wspomnianych procedur można poprawić efektywność energetyczną o 40% nawet w krajach, które wykorzystują ją najlepiej i stosują najnowsze rozwiązania technologiczne³⁹.

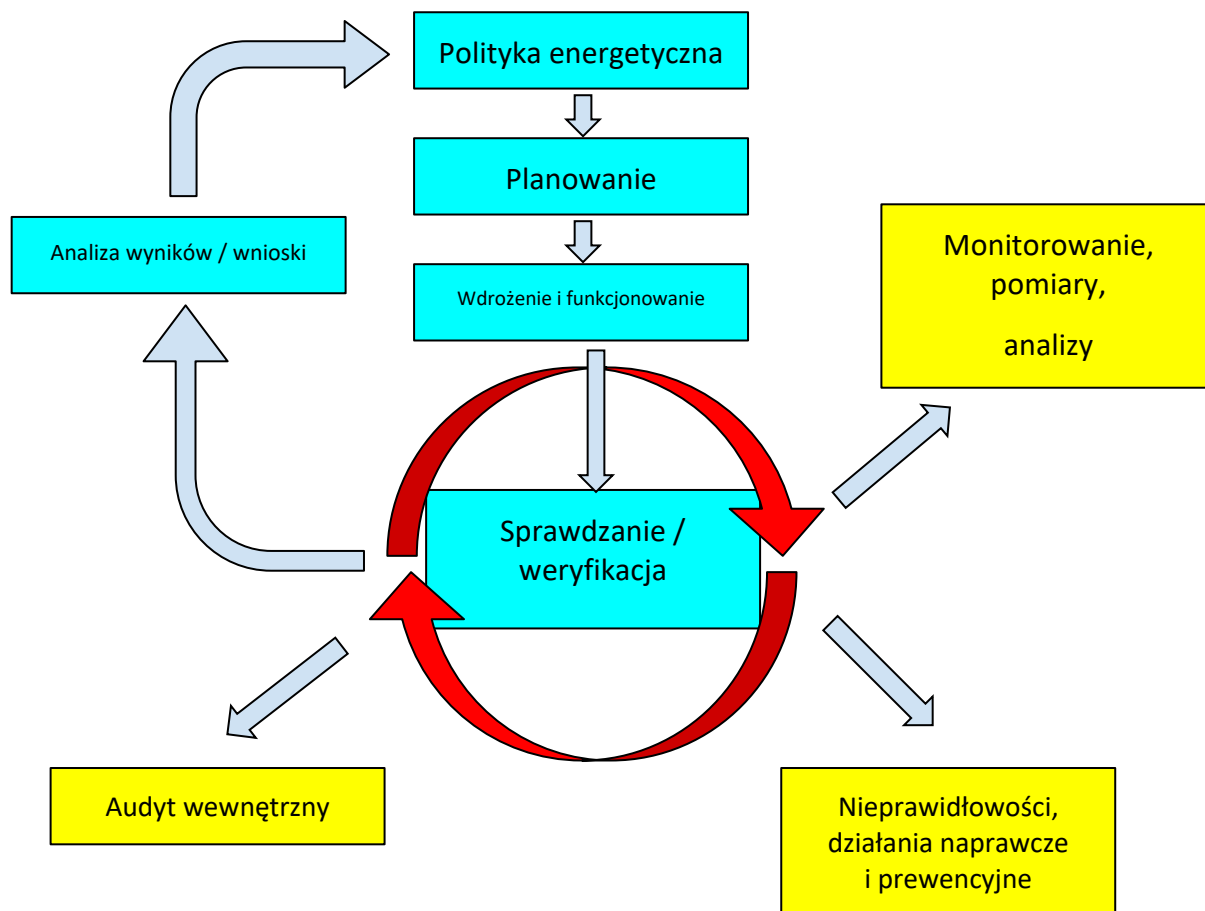
³⁶ S Jyothi Prasad Reddy "Airport Energy Efficiency and Management; Airports Council International Asia Pacific; 2014

³⁷ Albedo(łac. białość) - parametr określający zdolność odbijania promieni słonecznych; Wikipedia

³⁸ Kit Oung *Zarządzanie energią w przedsiębiorstwie* PWN SA Warszawa 2015 r. str. 145

³⁹ UNIDO (2015) Practical guide for implementing an energy management system. United Nations Industrial Development Organization, Vienna; <https://open.unido.org/api/documents/4784090/download/The%20UNIDO%20Programme%20on%20Energy%20Management%20System%20Implementation%20in%20Industry>; wejście 07.04.2021

Model zarządzania energią w porcie lotniczym, który można zbudować w oparciu o ISO 50001 ilustruje rys. 9⁴⁰.



Rys. 9 Model zarządzania w porcie lotniczym w oparciu o ISO 50001

Żaden system zarządzania energetycznego nie może funkcjonować bez zrozumienia i akceptacji kierownictwa portu lotniczego. Zgodnie ze schematem powyżej powinien on określić politykę energetyczną w oparciu o przyjętą strategię i cele do osiągnięcia. Do jej realizacji musimy zapewnić odpowiednio wykwalifikowaną kadrę, wiedzę ekspercką, dostęp do odpowiedniej technologii i fundusze. Bezpośredni wpływ na przyjmowaną strategię oprócz kierownictwa portu lotniczego mają wymagania i standardy określone przez cywilne władze lotnicze oraz partnerzy korzystający z infrastruktury lotniskowej (np. linie lotnicze). Polityka energetyczna w porcie lotniczym może być ukierunkowana na stałą poprawę efektywności

⁴⁰ ISO (International Organization for Standardization) (2011) ISO 50001 energy management systems—requirements with guidance for use. ISO Central Secretariat, Geneva

energetycznej przy jednoczesnym rozwoju zdolności i jakości oferowanych usług i powinna zawierać następujące kryteria:

- wykorzystanie źródeł energii w najbardziej optymalny sposób, przy zachowaniu poziomu bezpieczeństwa i komfortu podróżnych;
- zakładany przedział czasu i stopień redukcji zużycia energii;
- zakładaną poprawę wskaźników ekonomicznych w wyniku podjętych działań;
- poziom redukcji emisji szkodliwych pierwiastków do atmosfery i budowę wizerunku firmy dbającej o środowisko, poprzez maksymalizację wykorzystania rozwiązań proekologicznych;
- stałą budowę świadomości energetycznej, kultury organizacji oraz zaangażowania całego składu osobowego w proces, w tym budowę odpowiednich struktur;
- stałe monitorowanie procesu zużycia energii i zapewnienie środków i danych niezbędnych do uzyskania zakładanych celów;
- zgodność podejmowanych działań z obowiązującymi normami, standardami i przepisami.

Może obejmować inne zapisy, wynikające ze specyfiki, struktury własnościowej i przeznaczenia portu lotniczego.

Kolejnym elementem procesu jest planowanie energetyczne. Po pierwsze trzeba poznać pełną charakterystykę energetyczną portu lotniczego. Analiza danych historycznych na temat zużycia energii z podziałem na źródła energii, zasilane przez nie urządzenia i procesy, elementy generujące największe zużycie lub zapotrzebowanie na moc jest niezbędne. Na tym etapie trzeba zbudować klasyfikację systemów energetycznych, układów i urządzeń według zużycia energii, jej kosztów, potrzeb modernizacyjnych i remontowych. W ten sposób można zdefiniować obszary przyszłych działań oraz obliczyć jednostkowe zużycie energii dla poszczególnych elementów lotniska, budując swoistą mapę energetyczną. Dzięki temu można zrozumieć jak sieć energetyczna funkcjonuje, czyli jak wygląda profil energetyczny lotniska. W dużej mierze wyniki zależą od jakości przeprowadzanych audytów energetycznych.

Zasadniczo termin “audyt energetyczny” stosuje się do jednego lub kilku spośród poniższych pięciu narzędzi i technik⁴¹:

- sprawozdawczości energetycznej;
- bilansowania energetycznego;
- monitorowania i określenia docelowego zużycia energii;
- benchmarkingu energetycznego;
- wyszukiwania okazji energetycznych.

Zbieranie danych z portu lotniczego do powyższych celów może być realizowane z podziałem na następujące trzy kategorie⁴²:

- administracyjne;
- statystyczne;
- meteorologiczne.

Dane administracyjne zwykle umieszczone w Publikacji Informacji Lotniczych AIP⁴³ obejmujące godziny operacyjne dla poszczególnych obiektów i urządzeń lotniska, obiekty dla pasażerów, typ oświetlenia lotniskowego, urządzenia nawigacyjne i meteorologiczne oraz inne ważne informacje związane z jego funkcjonowaniem. Dane te pozwalają, poprzez przeprowadzenie analiz, na ustalenie związków między zużyciem energii, a operacjami realizowanymi przez lotnisko.

Dane statystyczne odnoszą się do liczby pasażerów i operacji lotniczych. Mają one bezpośredni związek ze zużyciem energii przez port lotniczy (więcej pasażerów i lotów, to więcej instalacji, systemów i urządzeń operujących).

Wreszcie specyfika funkcjonowania portów lotniczych oparta jest na zależności od warunków meteorologicznych w otaczającej przestrzeni powietrznej. Istotnym elementem systemu jest stacja meteorologiczna dostarczająca informacji o temperaturze, sile i kierunku wiatru, widzialności, czy opadach atmosferycznych. Te dane wpływają na intensywność startów i lądowań, wymagania oświetleniowe, czy systemy ogrzewania i chłodzenia. Dobre rozpoznanie profilu energetycznego lotniska

⁴¹ Kit Oung Zarządzanie energią w przedsiębiorstwie PWN SA Warszawa 2015 r. str. 59

⁴² Ortega, S.; Manana, M. Characterisation 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 07.04.21

⁴³ (z ang.) Aeronautical Information Publication

ma zasadniczy wpływ na dalsze rezultaty prac oraz uzyskiwane efekty, dlatego ten temat zostanie szczegółowo opisany w oddzielnym rozdziale.

Aby dobrze zdefiniować zależności między zużyciem energii, a zmiennymi wpływającymi na tą wielkość na lotnisku, niezbędne jest dokonanie analiz pozwalających na prognozowanie przyszłego zużycia energii. Metody te można podzielić na dwie grupy: metody statystyczne i metody sztucznej inteligencji. Metody te mogą się wzajemnie uzupełniać, tworząc także hybrydowe metody sztucznej inteligencji⁴⁴.

Na przykład, przy użyciu modelu regresji niezbędne jest zdefiniowanie tych zmiennych, które w najbardziej prawdopodobny sposób wpływają na zużycie energii. Stopień zależności zmiennych określa współczynnik korelacji R^2 . Zwykle mieści się on w przedziale od 0 do 1. Im bliżej wartości 1, tym zidentyfikowana korelacja wyższa, a zmienne właściwie rozpoznane.

Następnie należy określić wskaźniki wydajności energetycznej (EnPI) na podstawie analizy danych historycznych dotyczących zużycia energii i zmiennych charakterystycznych dla portu lotniczego takich jak liczba obsłużonych pasażerów, liczba obsłużonych lotów, ilość przewiezionych ładunków, wskaźniki ogrzewania HDD⁴⁵, czy wskaźniki chłodzenia CDD⁴⁶. Dobór tych wskaźników wynika z potrzeb konkretnego lotniska. Uznaje się, że wskaźnik określający zużycie kWh energii na pasażera (EPIs)⁴⁷ jest najbardziej przydatnym wskaźnikiem wydajności energetycznej⁴⁸. Należy jednak pamiętać, że wskaźnik ten nie może być wykorzystywany do benchmarkingu z innymi portami lotniczymi, ponieważ nie wskazuje on przyczyn złego lub dobrego zarządzania energią, które mogą zależeć od innych czynników charakterystycznych dla danego portu lotniczego. Pełny obraz można uzyskać poprzez

⁴⁴ Piotr Helt, Morosław Parol, Paweł Piotrowski; "Metody sztucznej inteligencji. Przykład zastosowań w elektroenergetyce" Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; Warszawa 2012, str. 81

⁴⁵ wskaźnik ilościowy określający ilość energii niezbędnej na ogrzanie budynku (ang. heating degree day -HDD)

⁴⁶ wskaźnik ilościowy określający ilość energii niezbędnej na ochłodzenie budynku (ang. cooling degree day - CDD)

⁴⁷ (z ang.) Energy Performance Indicator

⁴⁸ 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>

analizę więcej niż jednego wskaźnika. Dane wyjściowe pomogą w określaniu celów i pomiarze uzyskanych w drodze wprowadzanych zmian efektów.

Tworząc plan poprawy efektywności energetycznej można przyjąć cały szereg założeń, które go uporządkują, zapewnią przejrzystość, prostotę i wykonalność. Dla przykładu można nadać priorytet działaniom ukierunkowanym na uzyskanie maksymalnego efektu w postaci redukcji zapotrzebowania na energię, przy jak najmniejszych środkach niezbędnych na inwestycje. Założyć pełną zgodność przyjmowanych rozwiązań ze standardami określonymi w przepisach, przy jednoczesnej prostocie stosowanych technologii i niskich kosztach ich wdrożenia. Oczywiście można uwypuklić potrzeby zastosowania najbardziej wydajnych energetycznie systemów, zaznaczyć minimalizację wpływu na środowisko, czy też oczekiwania w stosunku do wykorzystania danego źródła energii, w tym odnawialnej.

Zbudowanie planu, w tym uzyskanie pełnej wiedzy na temat aktualnego profilu energetycznego portu lotniczego tworzy warunki do realizacji następnego kroku, czyli implementacji. Mając dobrze rozpoznany profil energetyczny i zależności między źródłami energii, zużyciem a zmiennymi wpływającymi na energochłonność oraz posługując się danymi historycznymi, należy zorganizować i wdrożyć narzędzie, które pozwoli na osiągnięcie zakładanych celów. Do tego potrzebny jest dobrze zaprojektowany system nadzoru i kontroli w celu określenia stopnia osiągnięcia zakładanych celów i weryfikacji wskaźników. Budowa tego systemu obejmuje zarówno działania organizacyjne jak i techniczne.

Po stronie elementów organizacyjnych można ująć:

- zaangażowany w proces i zmotywowany do działania zespół;
- system szkolenia umożliwiający budowanie świadomości i wiedzy eksperckiej;
- budowę kultury całej organizacji w oparciu o dbałość o środowisko i działania energooszczędne;
- tworzenie komórki dedykowanej do zarządzania energią;
- zatrudnienie odpowiednio przygotowanych kadr.

Kluczowe jest utworzenie właściwie skomponowanej komórki odpowiedzialnej za zarządzanie energią. Musi ona posiadać kompetencje inżynierskie do realizacji wszystkich funkcji technicznych związanych z analizami energetycznymi,

planowaniem, przeprowadzaniem badań, monitorowaniem systemu energetycznego, opracowywaniem planów eksploatacji odbiorników energii, czy prowadzeniem prac badawczo-rozwojowych. Organ ten powinien posiadać zdolność do budowy i nadzoru nad zespołem obsługowo-naprawczym portu lotniczego, zapewniającym bezawaryjną pracę i usuwanie wszelkich awarii, nieprawidłowości w funkcjonowaniu systemów i urządzeń. W praktyce około 70 % obniżonej sprawności urządzeń zasilanych energią elektryczną wynika wprost z niskiej jakości obsługi inżynierskiej i serwisowej, z tego 80% problemów przejawia się w pierwszym roku eksploatacji⁴⁹. Kompetencje organu zarządzania energią powinny obejmować nadzór nad zagadnieniami związanymi z energochłonnością pozyskanych na potrzeby lotniska maszyn i wyposażenia. Ta komórka powinna kontrolować proces szkolenia i budowy świadomości energetycznej całego stanu osobowego lotniska.

Po stronie technicznej to tworzenie narzędzi wspierających proces ciągłej poprawy efektywności, zapewniających właściwe utrzymanie źródeł, odbiorników, systemów przesyłowych regulatorów i urządzeń w sprawności technicznej.

W tym obszarze mieści się budowa autonomicznych systemów monitorowania i zarządzania (systemy inteligentne), wyposażone w zestawy czujników, układy pomiarowe oraz algorytmy pozwalające na analizę, sterowanie i zarządzanie procesami energetycznymi. Oprogramowanie wspomagające zarządzanie energią musi gromadzić różnego rodzaju dane, wyliczać wskaźniki efektywności, generować analizy energetyczne, krzywe trendu, listy komunikatów alarmowych i tworzyć skomplikowane raporty graficzne. Wypracowywane dane mogą obejmować również analizy kosztów i wskaźniki ekonomiczne. Do monitorowania i diagnostyki pracy systemów elektroenergetycznych, detekcji i identyfikacji uszkodzeń można wykorzystać sieci neuronowe. Można korzystać z rozwiązań własnych lub pozyskiwać projekty z zewnątrz.

Jednym z takich rozwiązań jest narzędzie opracowane z funduszy europejskich, które zostało wdrożone przez Komisję Europejską pod nazwą CASCADE. Celem tego przedsięwzięcia było opracowanie narzędzia pomiarowego zbudowanego w oparciu o technologie informatyczne i transferu danych bazującego na normie zarządzania

⁴⁹ Kit Oung *Zarządzanie energią w przedsiębiorstwie* PWN SA Warszawa 2015 r. str. 105

energią ISO-50001, a integrującego w sobie metody wykrywania i diagnozowania uszkodzeń. Narzędzie to miało pomóc w redukcji zapotrzebowania na energię w portach lotniczych o 20% w perspektywie krótkoterminowej. Skoncentrowano się na najbardziej energochłonnych instalacjach HVAC. System umożliwia szybkie i automatyczne wykrywanie błędów, zanim instalacje ulegną awarii lub też zanim zbyt wiele energii zostanie zmarnowanej, pomagając tym samym zespołom utrzymania portu lotniczego wdrażać działania korygujące i optymalizować wydajność urządzeń. W programie pilotażowym uczestniczą dwa największe porty lotnicze we Włoszech, rzymskie lotnisko Fiumicino i mediolańskie Malpensa. Z portów tych korzysta rocznie około 55 mln pasażerów. Po upływie pierwszych sześciu miesięcy etapu pilotażowego, system wykrył pewne wady czujników i sterowników dużej centrali uzdatniania powietrza w jednym z terminali Fiumicino. Okazuje się, że wymiana wadliwych czujników, czy regulacja sterowników przyniesie oszczędności szacowane na 500 MWh, co przekłada się na 3,5 tys. ton CO₂ lub 70 tys. Euro⁵⁰.

Ponadto do procesu wdrożenia planu poprawy efektywności energetycznej można zaliczyć następujące działania:

- zapoznanie całego personelu portu lotniczego z przyjętą strategią i planem;
- wytworzenie dokumentacji szkoleniowej (broszur, filmów, prezentacji);
- stworzenie systemu komunikacji z użyciem dostępnych narzędzi i technik na potrzeby wewnętrzne (budowa kultury organizacji) i zewnętrzne (wizerunek portu lotniczego) - np. poczta elektroniczna, internet, cykliczne wydawnictwa, biuletyny, odpowiednio sprofilowane spotkania, konferencje, czy grupy robocze;
- rejestrowanie i dokumentowanie wszystkich działań w obszarze efektywności energetycznej zgodnie z wymogami normy ISO 50001 (w tym wyniki przeglądów, analizy monitoringu, rejestr szkoleń, rejestry działań legalizacyjnych i kalibracyjnych aparatury kontrolno-pomiarowej, stwierdzone nieprawidłowości w funkcjonowaniu systemów i urządzeń, oceny zgodności

⁵⁰ <https://cordis.europa.eu/article/id/93078-cascade-reducing-energy-use-by-airports/pl>; wejście 25.03.2021

z normami, wyniki audytów, działań zapobiegawczo-naprawczych, osiągnięte efekty wdrażanych zmian);

- zorganizowanie sprawnego systemu obsługowo-naprawczego, realizującego zadania w systemie planowo zapobiegawczym, według ściśle określonego cyklu i przez profesjonalnie przygotowany zespół inżynierów;
- stały monitoring realizowanych działań pod kątem zapewnienia ciągłości rozwoju z uwzględnieniem wszystkich aspektów cyklu życia urządzeń i zmiany ich charakterystyk energetycznych;
- analiza wszelkich podejmowanych działań w ramach portu lotniczego z uwzględnieniem w specyfikacjach, wymaganych aspektów energetycznych i wpływu na środowisko naturalne (zakupy urządzeń, źródeł zasilania, inwestycje infrastrukturalne, zmiany organizacji pracy, pozyskiwanie nowych zdolności).

Osią całego cyklu zarządzania jest sprawdzanie i weryfikacja, czyli trzeci krok w cyklu Deminga. W tym kroku, poprzez ciągłe monitorowanie systemu energetycznego, dokonywanie pomiarów i analiz następuje sprawdzenie, czy przyjęte w planie cele są osiągnięte, czy opracowana strategia się sprawdza, a zestaw narzędzi i metod przyjęty do ich realizacji jest właściwy. Bazując na wiarygodnych danych gwarantowanych przez systemy skalibrowanych i ściśle monitorowanych mierników, analizowane powinny być wszystkie przyjęte wskaźniki efektywności energetycznej i porównywane z planami. Analizie porównawczej należy poddać aktualne zużycie energii z prognozą wykonaną np. metodą regresji. Uzyskane wyniki powinny wskazać osiągnięte oszczędności w stosunku do zakładanych. Ujemna różnica między aktualnym zużyciem a predykcją wskazuje na uzyskane oszczędności. W przypadku innego wyniku, niezbędne jest podjęcie analiz wskazujących na przyczyny takiego stanu i zdefiniowanie działań korygujących.

Weryfikacja powinna być realizowana również poprzez audyt. Powinien on być realizowany cyklicznie i w sposób jak najbardziej obiektywny. Można go realizować siłami własnymi lub poprzez podmiot zewnętrzny. Audyt powinien wykazać na ile podejmowane działania i ich wyniki są zgodne z założeniami, wskazywać na elementy wymagające korekty. Niezbędne jest zestawianie osiągniętych rezultatów z wynikami

audytów wykonywanych wcześniej, aby dokonać oceny uzyskanego postępu. Kierownictwo portu lotniczego po zapoznaniu się z wynikami powinno zlecić działania naprawczo-korygujące.

Wszelkie nieprawidłowości stwierdzone na etapie wdrażania podlegają analizom i ocenom. Podejmowane są działania korekcyjne w stosunku do zakłóceń o mniej złożonym charakterze i minimalnym wpływie na proces osiągnięcia zakładanych celów (np. odpowiednie regulacje i skalowanie urządzeń energetycznych stosownie do potrzeb).

Wyniki, efekty, analizy, wnioski i propozycje podlegają ocenie przez kierownictwo portu lotniczego. Na tej podstawie mogą być podejmowane decyzje o korekcie polityki energetycznej, planu działań, przesunięciu środków finansowych, zmianie punktów ciężkości, korekcie zakładanych wskaźników, zmianach organizacyjnych lub innych czynnikach powodujących skuteczne wdrażanie strategii. W efekcie powstaje plan działania na kolejny okres. Najlepszym rozwiązaniem wydaje się przyjęcie stałej częstotliwości czynności realizowanych w przedstawionym cyklu. Z reguły zarząd ocenia działalność w rozliczeniu rocznym, stąd analizy efektywności energetycznej i efekty podejmowanych działań powinny być prezentowane z tą samą częstotliwością. Dotyczy to również audytów energetycznych i raportów o energii.

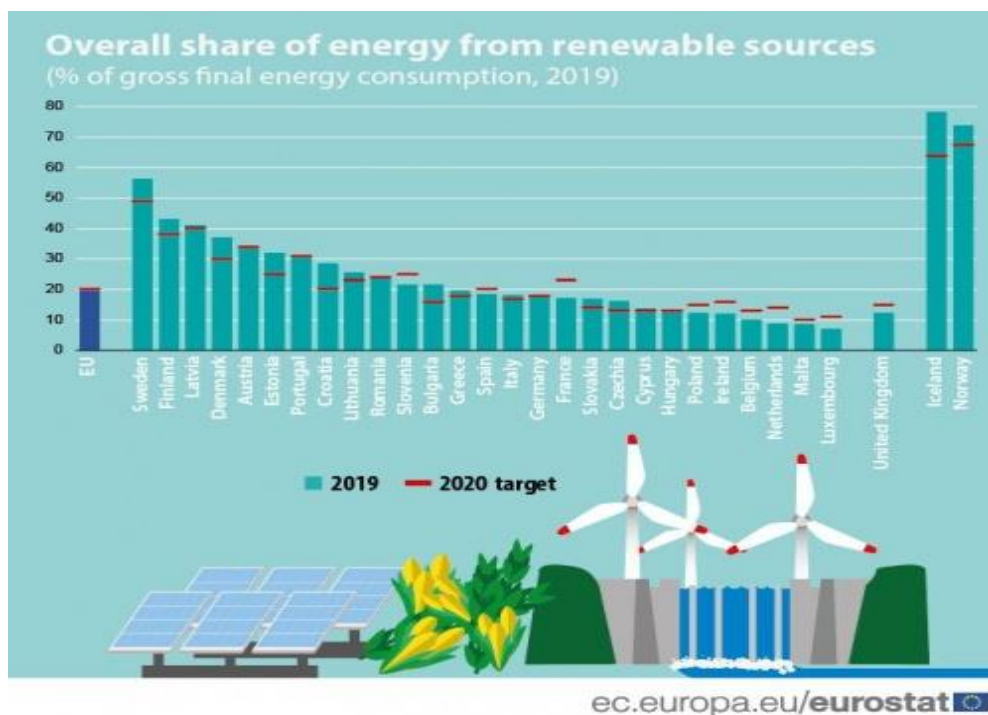
1.2.3 Wykorzystanie alternatywnych źródeł energii w portach lotniczych

Kolejnym obszarem związanym z poprawą efektywności energetycznej jest zastosowanie odnawialnych źródeł energii. Unia Europejska przyjęła bardzo ambitny cel związany z uzyskaniem przez kontynent europejski neutralności klimatycznej do roku 2050⁵¹.

Do końca 2020 r. zakładano, że UE uzyska 20% udziału w końcowym zużyciu energii brutto z odnawialnych źródeł energii. Rys. 10 przedstawia najnowsze dostępne dane dotyczące udziału energii odnawialnych w końcowym zużyciu brutto oraz cele wyznaczone na 2020 r. Udział odnawialnych źródeł energii w końcowym zużyciu

⁵¹ Europejski Zielony Ład ; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52019DC0640>; wejście 24.04.2021

energii brutto (z uwzględnieniem strat energii elektrycznej i ciepła w dystrybucji i przesyłach) wyniósł 19,7% w UE-27 w 2019 r. Dla porównania w 2004 r. wyniósł on



Rys. 10 Udział energii odnawialnej w UE i poszczególnych państwach w roku 2019 (źródło eurostat)

9,6%⁵².

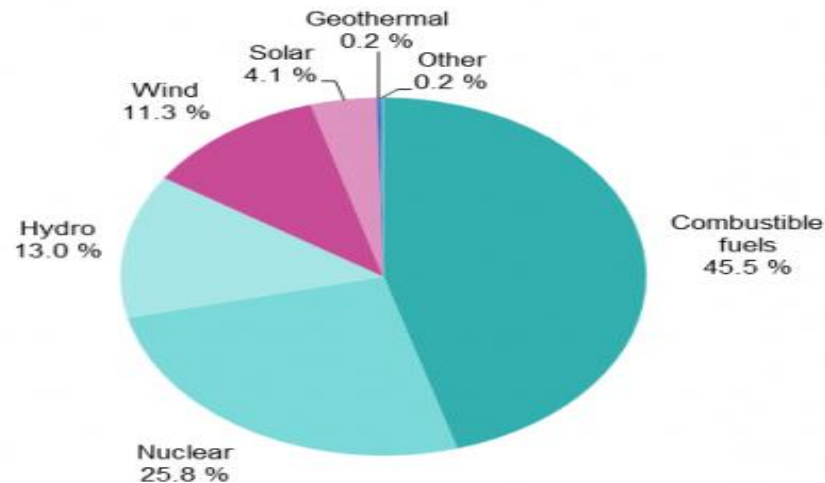
Prawie połowa (45,5%) energii elektrycznej netto wytworzonej w UE w 2018 r. pochodziła z surowców naturalnych (takich jak gaz ziemny, węgiel i ropa), a jedna czwarta (25,8%) pochodziła z elektrowni jądrowych. Wśród odnawialnych źródeł energii przedstawionych na rysunku 11, największy udział w produkcji energii elektrycznej netto w 2018 r. miały elektrownie wodne (13,0%), następnie turbiny wiatrowe (11,3%) i elektrownie solarne (4,1%).

Względne znaczenie odnawialnych źródeł energii w produkcji energii elektrycznej netto w UE wzrosło w latach 2008-2018 z 16,6% do 28,5%, przy czym nastąpił relatywnie duży spadek znaczenia paliw palnych z 53,6% do 45,5%, a także zmniejszenie udziału energii elektrycznej z elektrowni jądrowych z 29,6% do 25,8%. Wśród odnawialnych źródeł energii znacznie wzrósł udział energii elektrycznej netto

⁵² https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics; wejście 24.04.2021

wytwarzanej ze słońca i wiatru: z 0,3% w 2008 r. do 4,1% w 2018 oraz z 3,9% w 2008r. do 11,3% w 2018 r. ⁵³.

Net electricity generation, EU-27, 2018
(%, based on GWh)



Source: Eurostat (online data code: nrg_ind_peh)

eurostat 

Rys. 11 Udział poszczególnych źródeł produkcji krajów UE-27 w 2018 r. (źródło eurostat)

Intensyfikacja działań związanych z ochroną środowiska wymusza również reakcję po stronie podmiotów zajmujących się transportem lotniczym, w tym zarządzających portami lotniczymi. Wykorzystanie energii odnawialnej daje wiele korzyści dla portu lotniczego, jak i otaczającego go środowiska. Korzyści te mogą obejmować:

- zwiększenie niezawodności funkcjonowania portu lotniczego oraz zmniejszenie ryzyka prowadzonych operacji lotniczych (uniezależnienie od zewnętrznej sieci dystrybucyjnej i dostawców);
- łatwiejsze i bardziej przewidywalne zarządzanie kosztami funkcjonowania (niezależne od operatorów zewnętrznych);
- zapewnienie zgodności z przepisami lokalnymi, korzystanie z dotacji i zwolnień podatkowych;

⁵³ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_production,_consumption_and_market_overview#Market_shares; wejście 24.04.21

- spełnienie wymagań w zakresie emisji gazów cieplarnianych (wizerunek i opłaty emisyjne);
- potencjalne zyski z nadprodukcji energii⁵⁴.

Decyzja o zastosowaniu odnawialnych źródeł energii musi być poprzedzona działaniami opisanymi we wcześniejszych rozdziałach związanych ze zmniejszeniem zapotrzebowania oraz organizacją systemu zarządzania i nadzoru.

Typ źródła energii odnawialnej zastosowany w danym porcie lotniczym zależy od wielu czynników. Dostępne opcje zależą od tego jak port lotniczy wykorzystuje energię i jakie dostępne technologie związane z energią odnawialną stanowiąc będą najlepszą alternatywę. Położenie geograficzne i strefa klimatyczna są głównymi czynnikami decydującymi o doborze lokalnego źródła zasilania. Wykorzystywać należy te, które znajdują się w bezpośrednim zasięgu. Porty lotnicze położone bliżej równika zwykle mają większe nasłonecznienie i dają większe szanse na zbudowanie systemu zasilanego energią słoneczną. Te położone na większej wysokości, ze względu na występujące ekstremalne różnice temperatur między latem a zimą, mogą rozpatrywać zastosowanie geotermalnych pomp ciepła. Najsilniejsze wiatry występują na wybrzeżu morskim, przy dużych zbiornikach wodnych, na wyżynach i przy rozległym płaskim terenie. Aby uzyskać energię wodną trzeba mieć lokalizację w pobliżu rzeki o sile nurtu wystarczającym do napędu turbin lub morza z silnymi prądami. Na dużych wysokościach można wykorzystywać energię termalną do ogrzewania obiektów lotniskowych. Biomasa może mieć zastosowanie w regionach o intensywnych uprawach lub gdzie działalność leśna wytwarza ilość odpadów wystarczającą do efektywnego technologicznie i ekonomicznie wytwarzania energii. Ogniwa wodorowe mogą stanowić uzupełnienie dostępnej palety źródeł energii odnawialnej.

ICAO przeprowadziło na bazie 13 portów lotniczych studium przypadku w oparciu o zunifikowany kwestionariusz pytając między innymi o czynniki decydujące o podjęciu decyzji związanej z implementacją odnawialnych źródeł energii w porcie lotniczym.

⁵⁴ 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>; wejście 23.04.21

Z uzyskanych odpowiedzi wynika, że w 9 na 13 przypadków głównym motywem działań była ochrona środowiska, w 2 przypadkach względy ekonomiczne. W 2 na 10 przypadków zarówno czynnik ekonomiczny, jak i środowiskowy były na pierwszym miejscu⁵⁵.

1.3 Wykorzystanie energii słonecznej w portach lotniczych

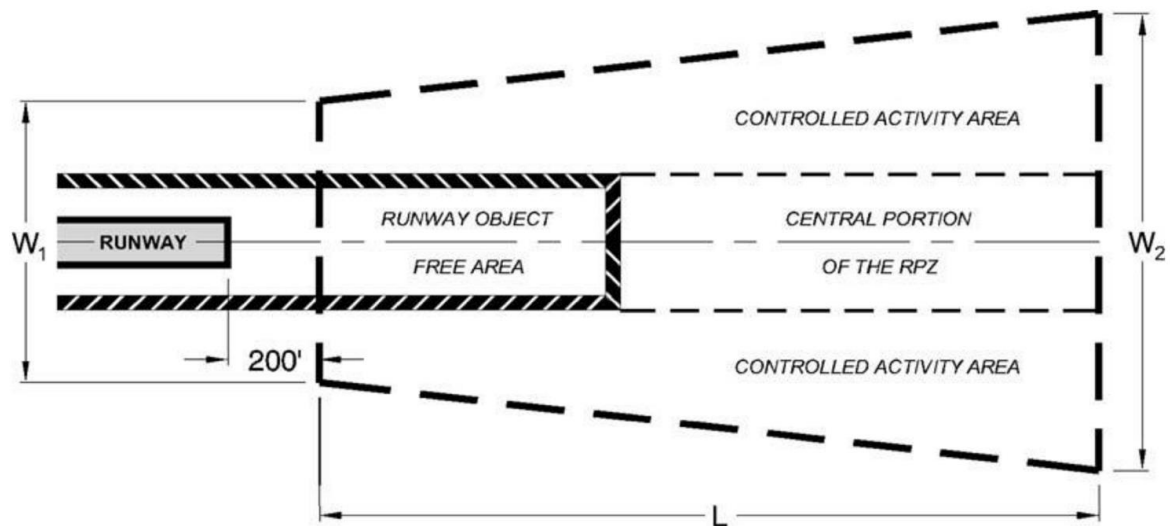
Energia z promieniowania słonecznego może być przetwarzana w elektryczną z wykorzystaniem ogniw fotowoltaicznych lub ciepłą przy użyciu kolektorów słonecznych. Ta technologia jest już dość dobrze rozwinięta, cechuje się znaczną wydajnością, lekkością, elastycznością i małą wysokością konstrukcji. Zazwyczaj porty lotnicze zajmują rozległe, płaskie tereny bez zacinienia, stąd potencjalnie są bardzo podatne na wykorzystanie energii słonecznej. Na terenie lotniska znajduje się wiele obiektów o dużych powierzchniach dachów i elewacji nadających się do tego typu instalacji takich jak terminale, czy zadaszone parkingi.

Zastosowanie paneli fotowoltaicznych na terenie lotnisk niesie za sobą ryzyko odbicia promieniowania słonecznego i powstania zjawiska olśnienia, które może zakłócać pracę pilotów lub wieży kontroli lotów, co jest niebezpieczne zwłaszcza podczas startu lub lądowania samolotów. Zjawisko to występuje zwłaszcza przy niskim położeniu słońca w stosunku do powierzchni paneli. Panele PV pod tym względem zachowują się jak fasady budynków pokryte szkłem, okna dachowe, szyby samochodowe, powierzchnie wody lub lodu (stawy, baseny). Odbicie światła od paneli może spowodować u pilota ślepotę odbłyiskową. Taka ślepota trwająca od 4-12 sekund (czas niezbędny na odzyskanie widzialności) pojawia się, gdy energia promieniowania słonecznego o wartości 7-11 W/m² (lub 650-1100 lumenów/m²) oświetli gałkę oczną⁵⁶. Projektowanie tego typu systemów wymaga więc uwzględnienia tych zjawisk poprzez właściwe ułożenie i nachylenie instalacji. Unika się instalowania na wprost (czyli na przedłużeniu pasa startowego i w kącie widoczności 25 stopni od jego osi. Zwłaszcza ich lokowanie w pobliżu pasów startowych jest ryzykowne. Ryzyko to może być

⁵⁵ A focus on the production of renewable energy at the Airport Site. Eco Airport Toolkit; ICAO; https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ecoairports/Final%20Energy_at_Airports_Case_Studies.pdf; wejście 23.04.21

⁵⁶ 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

również ograniczone poprzez zastosowanie głęboko teksturowanych szklanych osłon redukujących odbicie światła słonecznego. Strefy ograniczonego montażu fotowoltaiki w obrębie pasa startowego ilustruje rys. 12.



Rys. 12 Strefy ograniczeń montażu fotowoltaiki w obrębie pasa startowego (FAA Airport Design)⁵⁷

Zgodnie z wytycznymi Federalnej Administracji Lotniczej USA (FAA)⁵⁷ opisującymi standardy projektowania lotnisk zakazane jest montowanie elementów fotowoltaicznych w strefie drogi startowej (Runway), strefie wolnej pasa startowego od wszelkich obiektów (Runway Object Free Area), w strefie bezpieczeństwa pasa startowego (Runway Protection Zone) oraz w strefie kontrolowanej aktywności (Controlled Activity Area).

Ponadto do projektowania systemu paneli potrzebna jest wiedza na temat kąтового położenia słońca w stosunku do portu lotniczego jako funkcja zmienna w ciągu dnia oraz pory roku. Konieczne jest ustalenie intensywności światła słonecznego padającego na instalację PV w tej samej funkcji (pora dnia i pora roku). Dane takie można uzyskać z ośrodków zbierających dane pogodowe z setek stacji meteorologicznych na świecie. Dane te są wystarczające do skonstruowania typowego roku meteorologicznego. Buduje się go na bazie najbardziej typowych warunków pogodowych występujących w danej lokalizacji w poszczególnych miesiącach roku,

⁵⁷ FAA. 1989. Airport Design. FAA Advisory Circular 150/5300-13. Str. 29-30

tworząc z tak dobranych miesięcy typowy rok. W USA dane takie są dostępne na stronach internetowych w Narodowym Laboratorium Energii Odnawialnej (NREL)⁵⁸, poza USA w Światowym Centrum Danych Radiacyjnych (WRDC)⁵⁹ zlokalizowanym w Petersburgu w Rosji. Na stronach tych można znaleźć typowy rok meteorologiczny dla danej lokalizacji⁶⁰.

Współczynnik załamania światła w powietrzu wynosi 1,00, dla wody 1.33, dla typowej szyby 1,52. Pokrycie antyrefleksowe paneli pozwala obniżyć współczynnik do poziomu 1,20-1,30. Wynika z tego, że refleksy świetlne od nieruchomej tafli wody są mniejsze niż od zwykłej szyby. Ale przy użyciu odpowiednich technologii, refleksy od paneli PV mogą być mniejsze niż od nieruchomej tafli wody. Rys. 13 pokazuje zależność mocy odbicia promieni słonecznych od zwykłej szyby, nieruchomej tafli w stawie i paneli z pokryciem antyrefleksyjnym w zależności od kąta padania promieni słonecznych⁶¹.

Z wykresu widać, że kątem krytycznym jest kąt 60-70⁰, przy którym procentowa moc odbicia rośnie gwałtownie. Przez większość dnia słońce operuje wysoko przy bardzo małych odchyleniach kątowych od prostopadłej osi powierzchni odbicia. Refleks o mocy powyżej 20% występuje zwykle podczas pierwszej godziny od wschodu i na godzinę przed zachodem słońca. Wykres pokazuje również, że zakres refleksów pochodzących od nieruchomej tafli wody znajduje się pomiędzy zakresami dla obu typów szkła. Jakikolwiek powiew wiatru powoduje zaburzenia powierzchni i rozproszenie efektu lśnienia, co oznacza, że różnice tych zakresów nie są znaczne.

Jak kąt padania promieni słonecznych wpływa na efekt lśnienia widziany z wieży kontroli lotów, pokazuje rys. 14⁶².

⁵⁸ z ang. National Renewable Energy Laboratory

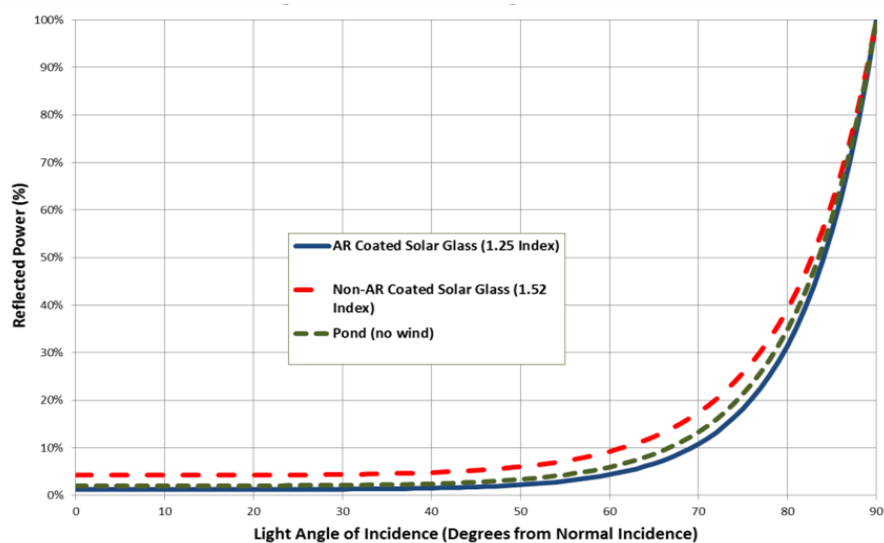
⁵⁹ z ang. World Radiation Data Center

⁶⁰ źródło danych dla typowego roku meteorologicznego "typica Meteorological Year - TMY"
<https://nsrdb.nrel.gov/data-sets/archives.html>

⁶¹ 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>; wejście 02.05.21

⁶² 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

Zależności te można wykorzystać w projektowaniu instalacji. Istnieją dwie metody, przy pomocy których można wpłynąć zarówno na efektywność energetyczną, jak i niepożądane efekty refleksów odbijanych od paneli PV. Można wydłużyć długość efektywnej pracy paneli w ciągu dnia poprzez zmianę kąta ich nachylenia w poziomie. Wyższe kąty załączają panel do pracy w późniejszej porze dnia i wyłączają wcześniej, niższe kąty dają przeciwny efekt. W ten sposób można również sterować odbijanym refleksem. Wydajność energetyczna paneli PV nie jest wrażliwa na zmiany kąta odchylenia w płaszczyźnie poziomej w większości lokalizacji.



Rys. 13 Zależność mocy refleksu dla różnych płaszczyzn od kąta padania promieni słonecznych na ich powierzchni⁶¹

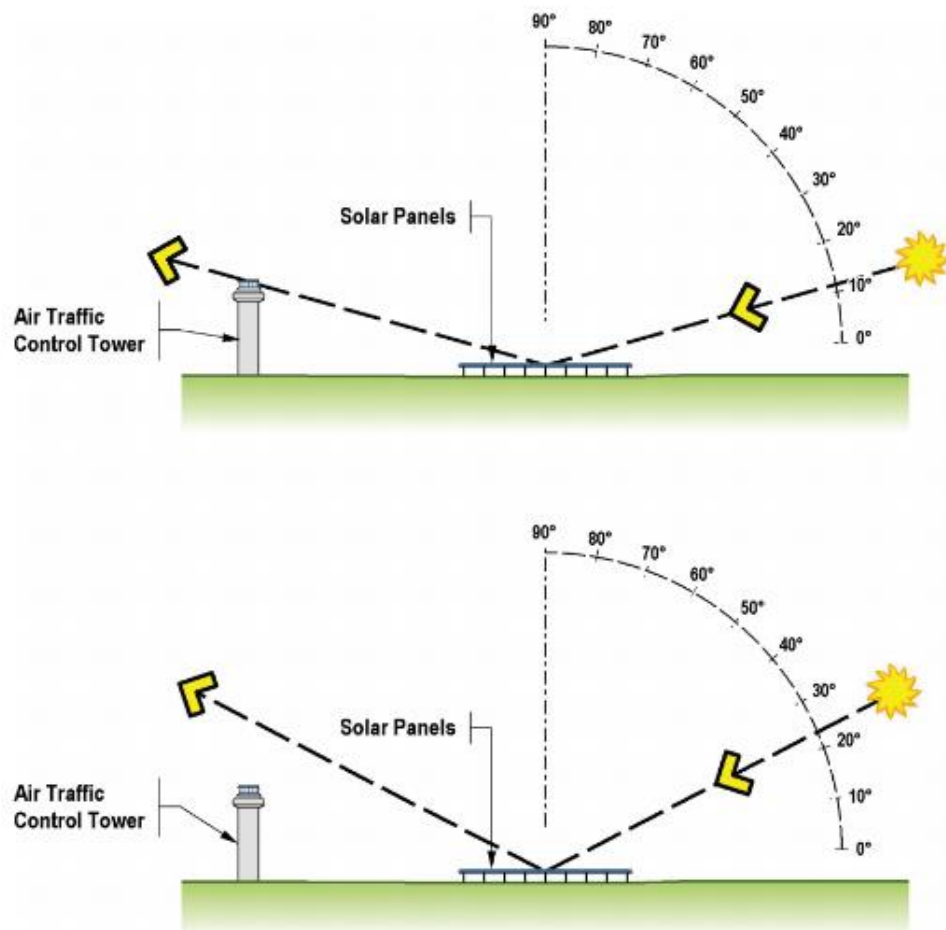
Natomiast zmiana kąta położenia paneli w azymucie pozwala zmienić rozpoczęcie efektywnego dnia pracy instalacji z godzin wcześniejszych na późniejsze.

Również w tym przypadku można sterować refleksem światła słonecznego. Dla większości lokalizacji wydajność energetyczna nie jest zbyt wrażliwa na zmianę kąta w azymucie $\pm 15^\circ$ od kierunku południowego.

W przypadku Polski optymalną orientacją dla paneli PV jest południe, przy kącie nachylenia 30 do 35 stopni, zależnie od szerokości geograficznej. Rys. 15 pokazuje straty wynikające z braku optymalnej orientacji paneli⁶³. Z rysunku wynika, że bardziej płaska orientacja jest korzystniejsza, jeśli nie można ustawić absorberów w kierunku południowym. Widać również wyraźnie, że przy nachyleniu 30 stopni i orientacji 45 stopni na południowy zachód uzyskujemy 95% optymalnego napromieniowania.

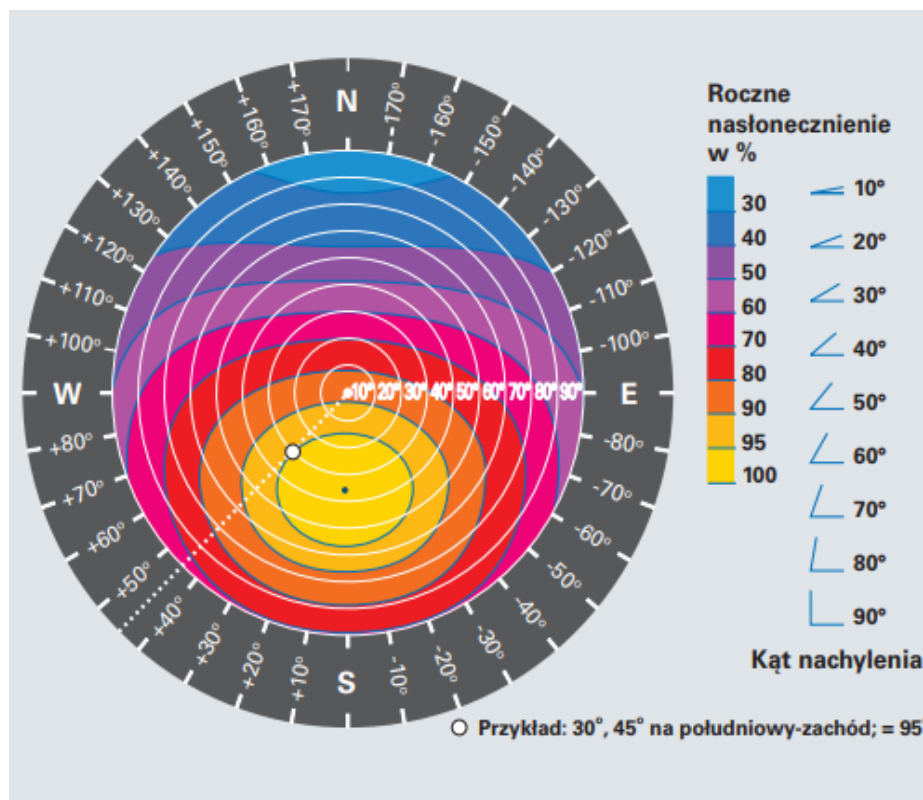
⁶³ Viessmann. Energetyka słoneczna – Zeszyty Fachowe 2012. Str. 12

Bardzo dobry wynik 85% można uzyskać przy ustawieniu paneli na wschód zachód przy kątach ich nachylenia między 25 a 40 stopni.



Rys. 14 Oddziaływanie efektu lśnienia na wieżę kontroli lotów⁶²

Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że zarówno problem wydajności energetycznej paneli, jak i odbijanych refleksów powinien być w pierwszej kolejności rozwiązany poprzez właściwy dobór kątów nachylenia i azymutu instalacji solarnych. Trzeba wybrać optymalne rozwiązanie. W przypadku trudności z wyeliminowaniem zjawiska refleksów świetlnych ustawieniem kątowym instalacji można rozważyć zastosowanie kosztowniejszych rozwiązań z powłokami antyrefleksyjnymi.



Rys. 15 Wpływ orientacji, nachylenia i zacinienia na energię napromieniowania⁶³

Innym problemem może być generowanie dodatkowej interferencji z systemem radarowym, które muszą być zbadane i uwzględnione w projektowaniu. Jednak ze względu na małą wysokość tego typu instalacji raczej nie powodują efektu odbić zakłócających zobrazowanie wskaźników radarowych a generowane pole jest zbyt słabe, aby wejść w interferencję z systemami radioelektronicznymi lotniska. Przy ich budowie unika się stosowania metalowych systemów mocowania na rzecz tworzyw sztucznych, czy włókien szklanych. Dodatkowo energia solarna nie przetworzona w panelu na energię elektryczną zamieniana jest w ciepło, podnosząc jego temperaturę do około 50 stopni Celsjusza latem. Utrzymująca się tak wysoka temperatura paneli, aż do zmierzchu może spowodować interferencję z układami komunikacyjnymi samolotu pracującymi w podczerwieni. Ryzyko nie jest duże, ale względy bezpieczeństwa nakazują ulokowanie paneli w promieniu nie mniejszym niż 150 stóp (około 46 m) od wieży kontroli lotów i systemów łączności⁶⁴.

⁶⁴ Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports; https://www.appropedia.org/Technical_Guidance_for_Evaluating_Selected_Solar_Technologies_on_Airports#Physical_penetration_of_airspace; wejście 25.04.21

Decyzja o tym, czy i jak wykorzystać energię słoneczną w porcie lotniczym zależy od lokalnych warunków pogodowych, ukształtowania terenu, wyboru technologii w jakiej wykonano panele, selekcji miejsc do instalacji oraz wyzwań technicznych związanych z połączeniem sieci paneli w całość.

Trzeba pamiętać, że sieć tego typu generuje energię z wykorzystaniem promieniowania słonecznego. Po zapadnięciu zmroku lotnisko musi korzystać z sieci zewnętrznej, innych źródeł energii odnawialnej bądź zasobu zgromadzonego w tzw. magazynie energii. Instalacje tego typu nie są w stanie zapewnić szczytowej mocy niezbędnej do operowania lotniska po zapadnięciu zmierzchu. Koszty instalacji fotowoltaicznych spadają w bardzo szybkim tempie ze względu na stale rosnący popyt i uzyskiwany efekt skali w ich produkcji. Koszty obsługi instalacji fotowoltaicznych są znikome a ich trwałość znaczna, sięgająca minimum 25 lat (średnio degradacja wydajności paneli wynosi 0,5% rocznie). Inwestycja w nie w sposób znikomy ingeruje w środowisko naturalne. Panele mogą być montowane na ziemi, dachu lub wspornikach. Przykłady zaprezentowano na rys. 16⁶⁵.

Systemy sterowania mogą być oparte na napędach hydraulicznych lub siłownikach elektrycznych. Instalacja takiego rozwiązania wymaga dokładnych analiz kosztów w stosunku do zysków w produkcji energii. Oprócz wzrostu kosztów budowy instalacji, należy uwzględnić większe wyzwania i nakłady na utrzymanie takiego systemu w sprawności przez cały cykl życia instalacji.

Autonomiczne, przenośne systemy fotowoltaiczne można również stosować jako systemy oświetleniowe części operacyjnej lotniska. Oświetlenie dróg startowych i dróg kołowania tego typu urządzeniami, wyposażonymi w oświetlenie LED oraz baterie ładowane z paneli fotowoltaicznych są dopuszczone przepisami lotniczymi pod warunkiem spełnienia wymagań zabezpieczenia funkcji oświetleniowych w sposób ciągły i są wykorzystywane na wielu lotniskach.

⁶⁵ Sukumaran Sreenath, Kumarasamy Sudhakar, Ahmad Fitri Yusop; Airport-based photovoltaic applications 19 February 2020; https://www.researchgate.net/publication/340039714_Airport-based_photovoltaic_applications ; wejście 25.04.21



Rys. 16 Trzy sposoby montażu paneli fotowoltaicznych⁶⁴

W portach mogą być również wykorzystywane inne technologie fotowoltaiczne takie jak krzemowe cienkowarstwowe ogniwa słoneczne, które mogą być nanoszone na różne elementy infrastruktury lotniskowej np. dachy i elewacje. Jest to fotowoltaika zintegrowana z budynkiem (BIPV⁶⁶). Trzy główne technologie cienkowarstwowych ogniw słonecznych obejmują krzem amorficzny (α -Si), selenek miedziowo-indowogalowy (CIGS) i tellurek kadmu (CdTe). Wydajność tych dwóch ostatnich prawie dorównuje wydajności krystalicznych ogniw słonecznych, a pierwszy ze względu na niską wydajność i degradację wywołaną światłem nie znalazł szerszego zastosowania⁶⁷. Można również tworzyć zintegrowane wielowarstwowe systemy fotowoltaiczne, które

⁶⁶ z ang. Building Integrated Photovoltaics

⁶⁷ Taesoo D. Lee, Abasifreke u. Ebong, Przegląd energii odnawialnej i zrównoważonej. Przegląd technologii cienkowarstwowych ogniw słonecznych i wyzwań, Tom 70, kwiecień 2017; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211631070X>; wejście 01.05.2021

cechują się jeszcze większą efektywnością. Konstrukcje te mogą być realizowane w oparciu o:

- sztywne moduły BIPV (np. tafle szklane lub metalowe płyty);
- elastyczne moduły BIPV (na bazie folii polimerowych lub blach);
- kolorowe i przezroczyste moduły BIPV.

Technologie te są w dalszym ciągu nowatorskie, a ich zastosowanie wymaga bardzo skomplikowanego projektowania przez odpowiednio przygotowanych inżynierów.

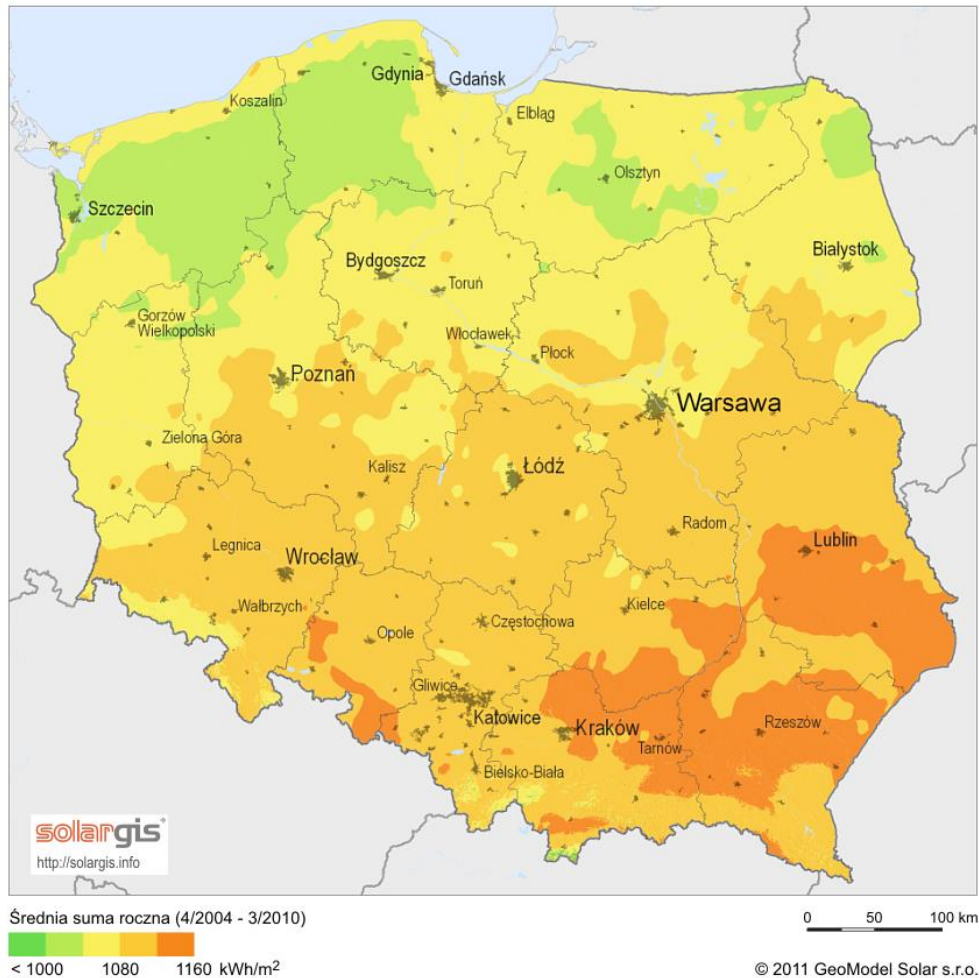
W Polsce istnieją dobre warunki do montażu systemów fotowoltaicznych. Natężenie promieniowania słonecznego przypadającego na 1m² płaszczyzny poziomej waha się pomiędzy 950-1150 kWh/m². Oznacza to, że z systemu o nominalnej mocy 1kW można uzyskać w Polsce około 900 - 950 kWh energii elektrycznej rocznie. Mapę Polski ilustrującą globalne nasłonecznienie na płaszczyźnie poziomej zaprezentowano na rys. 17⁶⁸.

Jak widać najlepsze warunki dla instalacji fotowoltaicznych występują w południowo-wschodniej części Polski, a najgorsze w części północno-zachodniej. Według danych statystycznych UE w 2018 r. w Polsce wyprodukowano z systemów PV 0,3 TWh, a całej UE ponad 110 TWh⁶⁹

Projektując instalacje fotowoltaiczne dobiera się panele, których podstawowym parametrem technicznym jest moc maksymalna w watach. Ze względu na zróżnicowanie nasłonecznienia w zależności od lokalizacji portu lotniczego nominalna moc paneli PV jest podawana dla standardowych warunków testowych (ang. Standard Test Conditions - STC).

⁶⁸ GS Energia, <http://www.gsphotovoltaika.pl/fotowoltaika/mapa-naslonecznienia-polski/>; wejście 02.05.21

⁶⁹ EU energy in figures, Statistical Pocketbook 2020; <file:///C:/Users/Dariusz/Downloads/MJAB20001ENN.en.pdf>; wejście 03.05.21



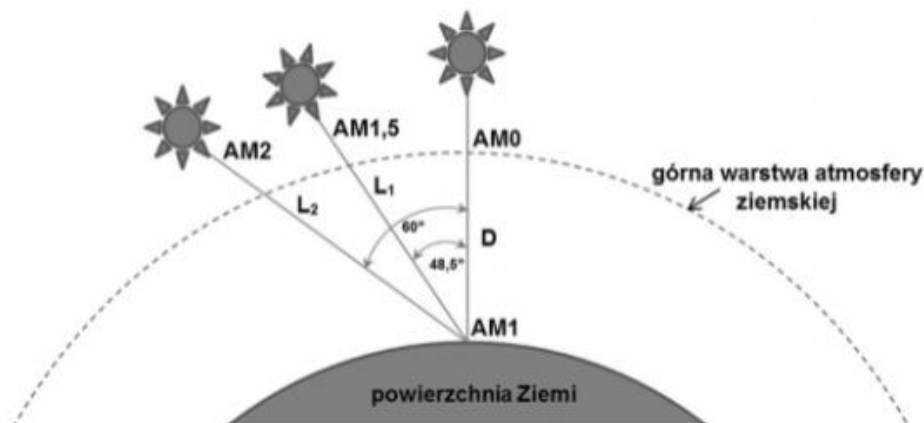
Rys. 17 Nasłonecznienie na terenie Polski w płaszczyźnie prostopadłej⁶⁸

Te standardowe warunki pomiarowe to: nasłonecznienie 1000 W/m^2 , temperatura ogniwa oświetlanego panelu 25°C , prędkość wiatru 1 m/s i spektrum promieniowania dla optycznej gęstości atmosfery na poziomie 1,5 (AM 1,5). Optyczną masę atmosfery AM definiuje się jako stosunek drogi promieniowania słonecznego przez atmosferę ziemską przy promieniowaniu padającym pod danym kątem L_x do długości drogi przy przejściu przez atmosferę pod kątem prostopadłym do powierzchni Ziemi D . Do określenia wartości AM wykorzystywana jest zależność (1.3.1)⁷⁰.

$$AM = \frac{L_x}{D} = \frac{1}{\sin \alpha_s} = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1.3.1)$$

Została ona zilustrowana rys. 18:

⁷⁰ 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. str.74-75



Rys. 18 Interpretacja geometryczna optycznej masy atmosfery AM⁷⁰

Ze względu na wpływ temperatury na parametry pracy paneli, często podaje się ją w odniesieniu do warunków rzeczywistych (ang. Normal Operating Cell Temperature - NOCT). Pomiary dla NOCT są realizowane przy natężeniu promieniowania słonecznego 800 W/m², temperaturze powietrza 20°C, prędkości wiatru i AM jak w STC.

Podstawowe parametry ogniw fotowoltaicznych można określić za pomocą charakterystyki prądowo-napięciowej. Określa ona najważniejsze parametry pracy ogniwa takie jak: prąd zwarciový I_{oc} i napięcie obwodu otwartego V_{oc} . Można z nich odczytać wartości natężenia IMPP i napięcia VMPP, dla których pole prostokąta przyjmuje wartość maksymalną (rys. 19)⁷¹.

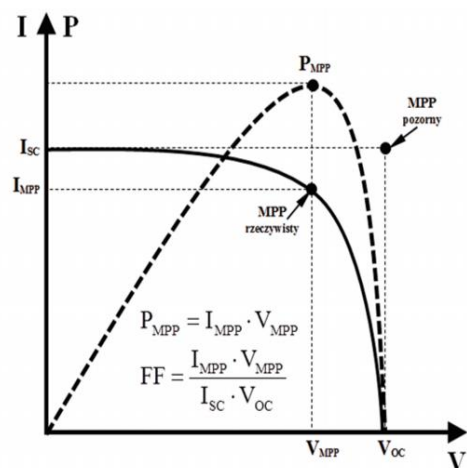
Na poniższym wykresie poszczególne symbole oznaczają:

P_{MPP} - moc maksymalna;

PF - współczynnik wypełnienia.

Współczynnik wypełnienia PF określa w jakim stopniu charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa PV jest zbliżona do idealnej, czyli do pola prostokąta. Maksymalna moc współczynnika wypełnienia wynosi 1, ale jest to wartość pozorna. W rzeczywistości przyjmuje on wartości w granicach 0,7 do 0,82.

⁷¹ Sarniak M.T., Budowa i eksploatacja systemów fotowoltaicznych. Medium 2015



Rys. 19 Charakterystyka prądowo-napięciowa i mocy paneli PV⁷¹

Współczynnik wypełnienia określany jest też jako stosunek mocy rzeczywistej generowanej przez ogniwo do mocy pozornej obliczonej z maksymalnych charakterystyk prądu i napięcia.

Najważniejszy parametr, który określa jakość ogniw fotowoltaicznych, to sprawność, którą można określić jako stosunek mocy maksymalnej generowanej przez ogniwo w zadanych warunkach do mocy promieniowania słonecznego padającego na ogniwo wyrażonego za pomocą następującego wzoru:

$$\eta = \frac{P_{max}}{G_{\beta} \cdot A} \quad (1.3.2)$$

gdzie:

P_{max} - moc panelu w W;

G_{β} - natężenie promieniowania słonecznego w W/m²;

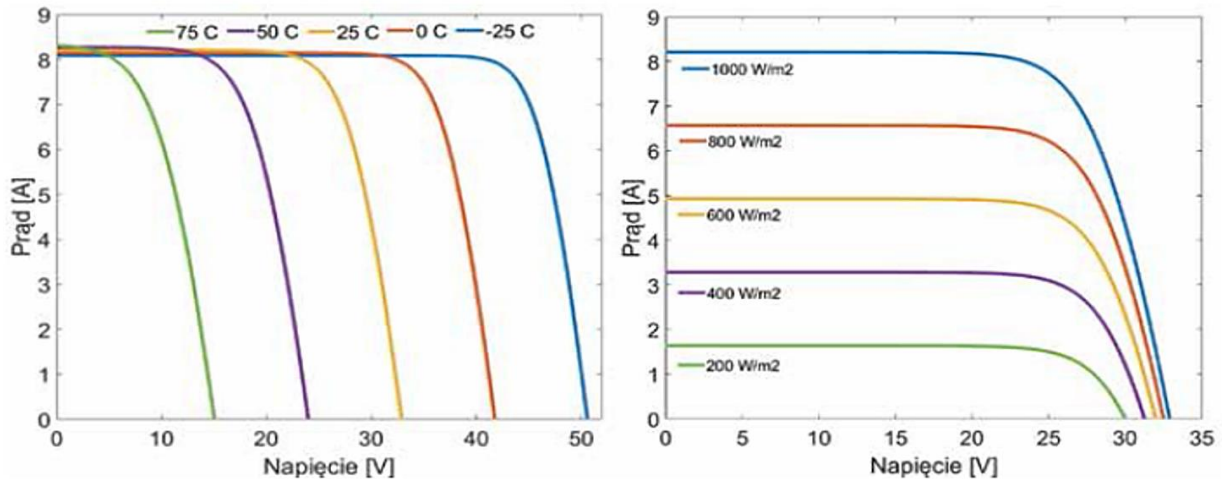
A - powierzchnia ogniwa w m².

Moc wytwarzana przez panel fotowoltaiczny jest kalkulowana na bazie jego mocy znamionowej, średniej (miesięcznej) dostępności energii słonecznej i spadku wydajności wynikającej z temperatury pracy.

Optymalna temperatura pracy paneli to 25⁰C, a produkcja energii spada każdorazowo o 5% przy wzroście temperatury zewnętrznej o 10⁰C⁷². Tak więc nie tylko długość czasu nasłonecznienia w ciągu doby ma wpływ na ilość wyprodukowanej energii. Zwłaszcza w klimacie słonecznym, ale w bardzo gorącym, pojawią się straty

⁷² Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports; FAA; April 2018; https://www.faa.gov/airports/environmental/policy_guidance/media/FAA-Airport-Solar-Guide-2018.pdf; wejście 01.05.21

wynikające z oddziaływania bardzo wysokiej temperatury zewnętrznej. W naszej strefie klimatycznej ogniwa w okresie letnim mogą się rozgrzać do temperatury 70-80°C. Wpływ ma temperatura pracy ogniw oraz natężenie promieniowania na charakterystyki prądowo-napięciowe ogniw PV, co ilustruje rys. 20⁷³.



Rys. 20 Zależność charakterystyk prądowo-napięciowych ogniw PV od natężenia promieniowania słonecznego oraz temperatury pracy⁷³

Z przedstawionych zależności wynika wzrost znaczenia właściwej ekspozycji ogniw na promieniowanie słoneczne oraz potrzeba stosowania układów chłodzenia.

Reasumując, w przypadku lotnisk zajmujących duże powierzchnie terenu, ilość wytworzonej w ten sposób energii w wielu przypadkach może zapewnić samowystarczalność, a wręcz nadprodukcję energii, która może być oddawana do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej.

Dodatkową zaletą wykorzystania tej technologii jest fakt, że zamontowane w szyku panele fotowoltaiczne odstrasza ptaki wpływając na bezpieczeństwo portu lotniczego, a nie mają żadnego negatywnego wpływu na otaczające środowisko naturalne⁷⁴. Wpisują się tym samym w program ograniczenia zagrożeń środowiskowych portu lotniczego.

⁷³ Parfianowicz Kamil. Wpływ usytuowania oraz warunków środowiskowych na moc uzyskiwaną z instalacji fotowoltaicznej. Przewodnik Projektanta wyd. 4/2020; <https://inzynierbudownictwa.pl/instalacja-fotowoltaiczna-od-a-do-z/> ; <https://inzynierbudownictwa.pl/instalacja-fotowoltaiczna-od-a-do-z/>; wejście 17.05.21

⁷⁴ DeVault, T.L.; Seamans, T.W.; Schmidt, J.A.; Belant, J.L.; Blackwell, B.F.; Moers, N.; Tyson, L.A.; Pelt, L.V. Bird use of solar photovoltaic installations at US airports: Implications for aviation safety. *Landsc. Urban Plan.* 2014, 122, 122–128.

Wykorzystanie kolektorów słonecznych do wytwarzania energii termalnej w portach lotniczych jest mniej powszechne, a rozwój i wdrażanie tych technologii znacznie wolniejsze w porównaniu do fotowoltaiki. Zalety tych systemów w aspekcie technicznym dla portu lotniczego są podobne do paneli PV. Ich przydatność występuje w przypadku ogrzewania budynków portu lotniczego systemami niskotemperaturowymi. Systemy te nie mają tych samych zalet jeśli chodzi o podłączenie do sieci i czerpanie korzyści z wymiany energii z odbiorcami zewnętrznymi poprzez sieci dystrybucyjne, a ich integracja z istniejącymi systemami jest bardziej złożona.

1.4 Wykorzystanie energii wiatrowej w portach lotniczych

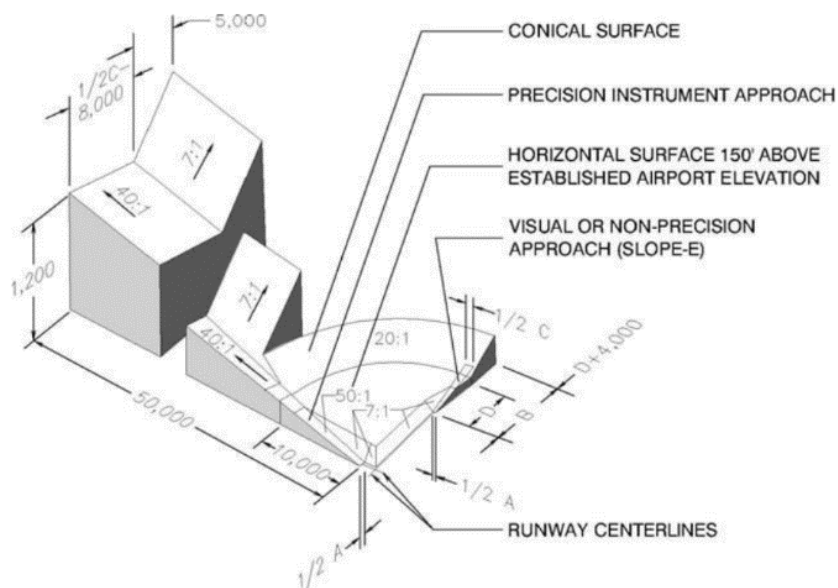
Wiatr jest znaczącym źródłem energii. Żadne inne źródło energii odnawialnej (poza hydroelektrowniami) nie jest w stanie wytworzyć energii porównywalnej do tradycyjnej elektrowni. Porównanie energetyki wiatrowej wypada bardzo dobrze w zestawieniu z kosztami produkcji energii ze źródeł konwencjonalnych. Zdaniem Komisji Europejskiej, koszty produkcji energii elektrycznej z elektrowni wiatrowych w 2020 r. w UE powinny być porównywalne z kosztami produkcji energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych, ale powinny być niższe od wszystkich innych technologii wytwarzania energii elektrycznej ze spalania węgla, gazu i ropy naftowej i to we wszystkich przyjętych scenariuszach zmian cen paliw kopalnych⁷⁵. Do 2000r. ponad 70% wszystkich elektrowni wiatrowych znajdowało się w Europie. Dane statystyczne UE z 2020r. wskazują, że produkcja energii z wiatru w 2018 r. przekroczyła poziom 320 TWh, z czego na Polskę przypada 12,8 TWh⁷⁶.

Zastosowanie nowych technologii w energetyce wiatrowej znacznie zwiększyło efektywność energetyczną tych rozwiązań. Buduje się coraz wyższe turbiny wiatrowe z wykorzystaniem lekkich i wytrzymałych materiałów. Mimo, że porty lotnicze zajmują rozległe i płaskie tereny, a więc potencjalnie są dobrym miejscem do wykorzystania wiatru, tego typu duże instalacje z reguły zwiększają zagrożenie dla lotnictwa. Ma ono

⁷⁵ 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

⁷⁶ EU energy in figures, Statistical Pocketbook 2020; file:///C:/Users/Dariusz/Downloads/MJAB20001ENN.en.pdf; wejście 03.05.21

charakter zarówno fizyczny (wysoka przeszkoda terenowa), jak i radioelektroniczny poprzez zakłócanie obrazowań systemów radarowych i radionawigacyjnych. Nie wyklucza to jednak zastosowania tego typu rozwiązań, wymagają one szczegółowych badań bezpieczeństwa ruchu lotniczego i interferencji z systemami radio nawigacyjnymi. Przepisy lotnicze w USA dość precyzyjnie definiują przestrzeń nawigacyjną. Rys. 21 ilustruje obszar lotniska, w obrębie którego wykonywane są operacje nawigacyjne z zaznaczeniem tego, że nie powinny się w niej znajdować żadne fizyczne przeszkody⁷⁷.



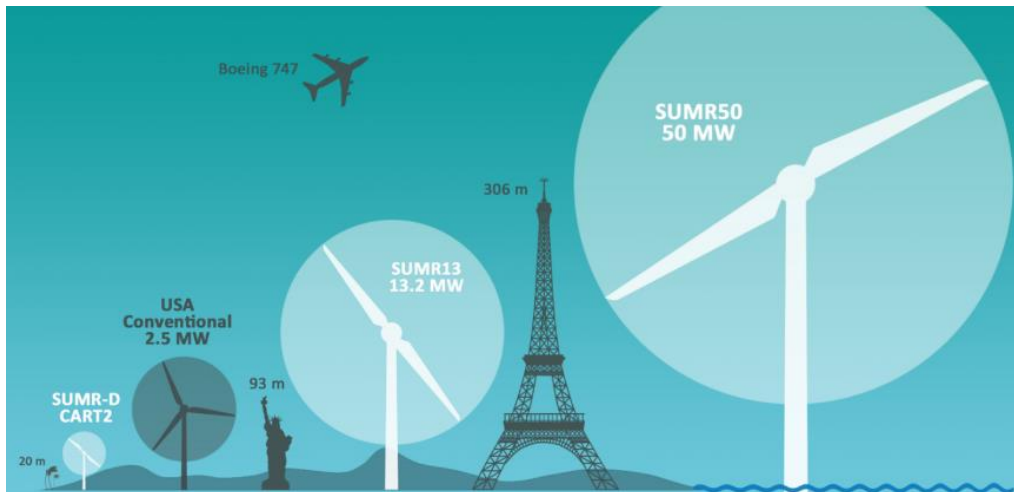
Rys. 21 Strefy zastrzeżone dla przeszkód fizycznych w obrębie operacji nawigacyjnych lotniska⁷⁷

Zwykle turbiny wiatrowe przekraczają wysokość 200 stóp (18,5 m), stąd ich budowa wymaga zgody właściwej władzy lotniczej. Największe budowane turbiny wiatrowe z segmentowym ultralekkim rotorem morfiogowym (SUMR) wytwarzają 13 MW energii. Łopaty takiego wirnika osiągają ponad 100 m długości. Są one najbardziej wydajne, bowiem im większy generator prądu stosujemy, tym koszt wytworzonej energii jest mniejszy. Pracuje się nad turbinami o mocy nawet 50 MW instalowanymi na morzu. Rys. 22 ilustruje rozmiar wprowadzanych turbin w odniesieniu do rozwiązania konwencjonalnego stosowanego w USA o mocy 2,5MW⁷⁸. Turbiny mniejsze o wysokości poniżej dziewięciu metrów wysokości mają podobną budowę jak

⁷⁷ FAA. 1989. Airport Design. FAA Advisory Circular 150/5300-13. str 37-38

⁷⁸ Segmented Morphing Ultralight Rotor (SUMR) Project, National Renewable Energy Laboratory, US. <https://engineering.virginia.edu/fril/projects/segmented-ultralight-morphing-rotor>; wejście 05.02.2021

dla typowych dużych turbin użytkowych, ale generują moc poniżej 100kW. Zazwyczaj nie są one montowane na lotniskach ze względu na wydajność energetyczną i ograniczenia przestrzenne. Ryzyko dla samolotów związane z umiejscowieniem turbin wiatrowych przy lotnisku jest większe niż korzyści wynikające z pozyskanej energii. Stąd niezwykle rzadko te rozwiązania mają zastosowanie. Zwykle wykorzystywane są turbiny zintegrowane z obiektami budowlanymi i na tych rozwiązaniach skupiono uwagę w ramach niniejszego dezyderatu.



Rys. 22 Turbiny SUMR a rozwiązania konwencjonalne (Renewable Energy for aviation. ICAO 2017)

Z obiektami lotniskowymi można raczej kojarzyć zastosowanie mikroturbin wiatrowych o małej mocy. Turbiny tego typu można podzielić ze względu na generowaną moc na⁷⁹:

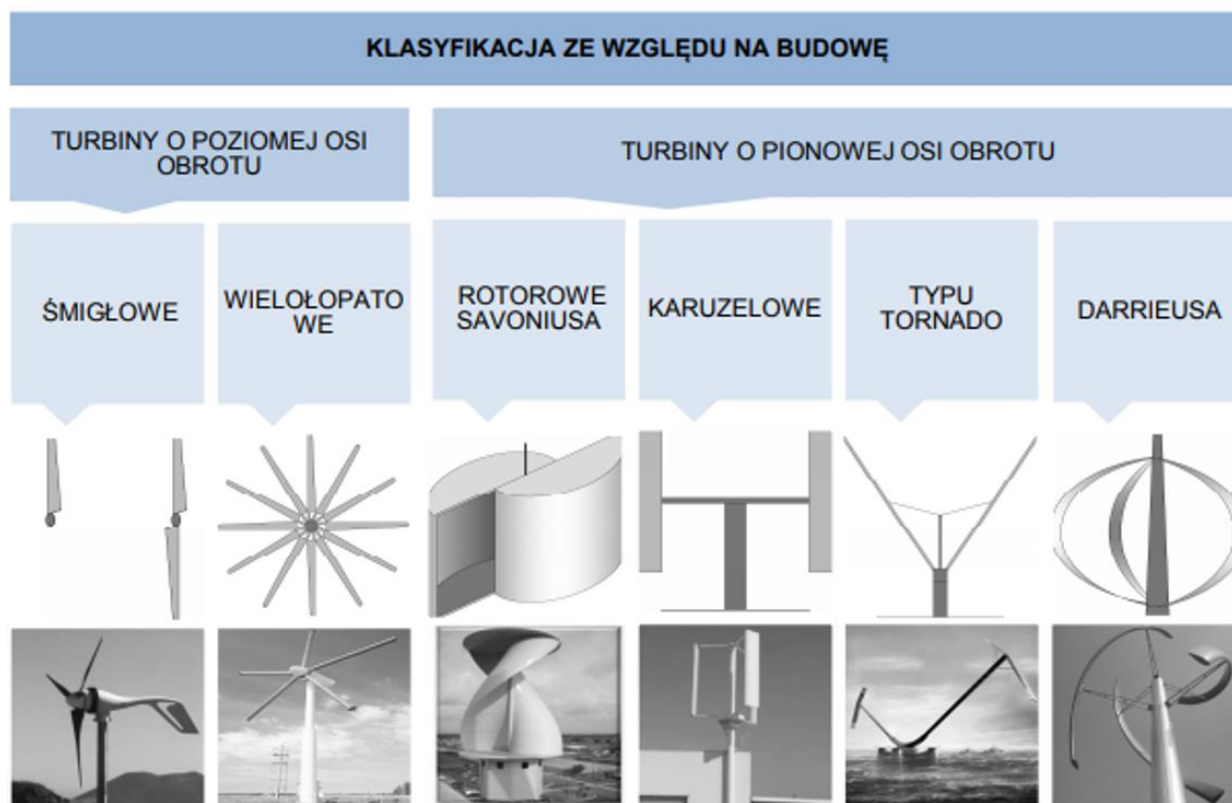
- mikroelektrownie wiatrowe - o mocy poniżej 110 W;
- małe elektrownie wiatrowe - o mocy od 100 W do 50 kW;
- duże elektrownie wiatrowe o mocy powyżej 50 kW.

Ze względu na położenie osi wirnika można rozróżnić:

- turbiny o poziomej osi obrotu określane jako turbiny typu HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbines*);
- turbiny o pionowej osi obrotu określane jako turbiny typu VAWT (*Vertical Axis Wind Turbines*).

⁷⁹ Radzewicz W. Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne turbin wiatrowych małej mocy. Politechnika Opolska. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe Nr 1/2015 (105). str. 145

Na rys. 23 przedstawiono cały szereg rozwiązań konstrukcyjnych turbin wiatrowych o różnym kształcie geometrycznym. W każdym z tych rodzajów można zastosować różne konstrukcje wirnika⁸⁰.



Rys. 23 Klasyfikacja turbin ze względu na budowę⁸⁰

Wyróżnia się trzy typy turbin wiatrowych powiązanych z obiektami budowlanymi:

- turbiny wiatrowe zamontowane na budynku (zwykle na dachu lub elewacji);
- turbiny wiatrowe zintegrowane z budynkiem (jako częścią budynku lub fasady);
- turbiny wiatrowe zwiększające przepływ powietrza (turbiny stanowią element architektury budynku zaprojektowanego od podstaw w sposób zwiększający przepływ strumienia w miejscu instalacji).

Rys. 24 ilustruje rodzaje i przykłady turbin wiatrowych powiązanych z obiektami budowlanymi.

W praktyce na istniejących obiektach portu lotniczego można zastosować jedynie turbiny zamontowane na budynku. Pozostałe typy rozwiązań mogą być brane pod uwagę jedynie w przypadku budowy nowych terminali.

⁸⁰ Aleksandra Głuchowska; Energia Wiatrowa w Architekturze; Politechnika Krakowska; Kraków 2019. str. 42

Generalnie najczęściej stosowane są turbiny o osi poziomej z wirnikiem trójłopatowym ze względu na najlepsze parametry wydajności względem wykorzystania mocy wiatru. Wymagają one podmuchu rozruchowego o prędkości 2,5 do 3 m/s, co jest charakterystyczne dla terenów bardziej zasobnych w energię kinetyczną wiatru. Ta konstrukcja wymaga ustawienia osi wirnika w kierunku wiejącego wiatru przy pomocy np. tzw. steru kierunkowego dla wiatru maksymalnego nie przekraczającego 25 m/s.



Rys. 24 Przykładowe zastosowania turbin wiatrowych na obiektach architektury budowlanej /opracowanie własne/

Turbiny w systemie VAWT cechują się startem przy niższych wartościach wiatru (około 1,5 m/s), cichą pracą, brakiem drgań i konieczności kierunkowania do wiatru, dużą odpornością na porywy silnego wiatru (nawet powyżej 40 m/s), prostą konstrukcją i żywotnością konstrukcji. Turbiny te nie stanowią również zagrożenia dla ptaków. Przegląd ofert rynkowych wskazuje, że mikroturbiny o pionowej osi obrotu są zazwyczaj droższe od turbin o osi poziomej i tej samej mocy znamionowej. Niższa wydajność energetyczna turbin VAWT wynika z faktu, że choć pracują one przy wietrze z dowolnego kierunku, to w odróżnieniu do turbin typu HAWT tylko część łopatek turbiny generuje energię. Dlatego też są one najczęściej wykorzystywane do zasilania pojedynczych urządzeń. Ostatnie badania pokazują, że turbiny wiatrowe tego typu są

jednak lepiej przystosowane do integracji z budynkami zwłaszcza w zabudowie miejskiej⁸¹.

Wiatrowe mikrogeneratory prądu mogą zasilać małe obiekty i urządzenia, które ze względu na odległość od obiektów głównych i związane z tym koszty i problemy techniczne nie są podłączone do głównej sieci zasilania (np. stacje meteo, urządzenia radionawigacyjne, elementy oświetlenia, znaki informacyjne). Tego typu systemy autonomiczne (często określane jako wyspowe) działają w układzie z baterią akumulatorów pozwalających na zapewnienie ciągłości pracy. W przypadku portu lotniczego należy mówić o systemach zintegrowanych z budynkami i podłączonych do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej.

Podobnie jak w układach fotowoltaicznych, energia wytwarzana przez turbiny wiatrowe w postaci prądu stałego zasila bezpośrednio urządzenia lub jest zamieniana na prąd zmienny przy pomocy przetwornika (falownika) i jest przekazywana do odbiorników przez instalacje obiektu budowlanego. Nadmiar energii przesyłany jest do sieci dystrybucyjnej zewnętrznej.

Podstawą analizy związanej z zastosowaniem turbin do generowania energii jest analiza prędkości wiatru w lokalizacji portu lotniczego, a ściślej zależy od jego energii kinetycznej, co wpływa na efektywność zastosowania turbin wiatrowych. W sposób ogólny dostępność wiatru na terenie Polski ilustruje opracowana przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej mapa (rys. 25) wskazująca trendy z podziałem na tzw. strefy wietrzne⁸².

Pomiary zostały wykonane w sześćdziesięciu stacjach meteorologicznych umieszczonych na podobnej wysokości w stosunku do gruntu. Z mapy tej wynika, że najlepsze warunki do wykorzystania mikroelektrowni występują na lotniskach położonych w rejonie nadmorskim oraz w pasie centralnym od granicy zachodniej przez Poznań, aż do okolic Warszawy.

⁸¹ Dilimulati Aierken, Stathopoulos Ted, Paraschivoiu Marius, Wind turbine design for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines, "Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics", Vol. 175, 2018, p. 179–192.

⁸² Korab. R. Energia odnawialna. Mikroelektrownie wiatrowe w systemach zasilania budynków. Politechnika śląska. Nr ref EIM: EIM05141. str. 5



Rys. 25 Strefy wietrzne w Polsce wg. IMGW⁸²

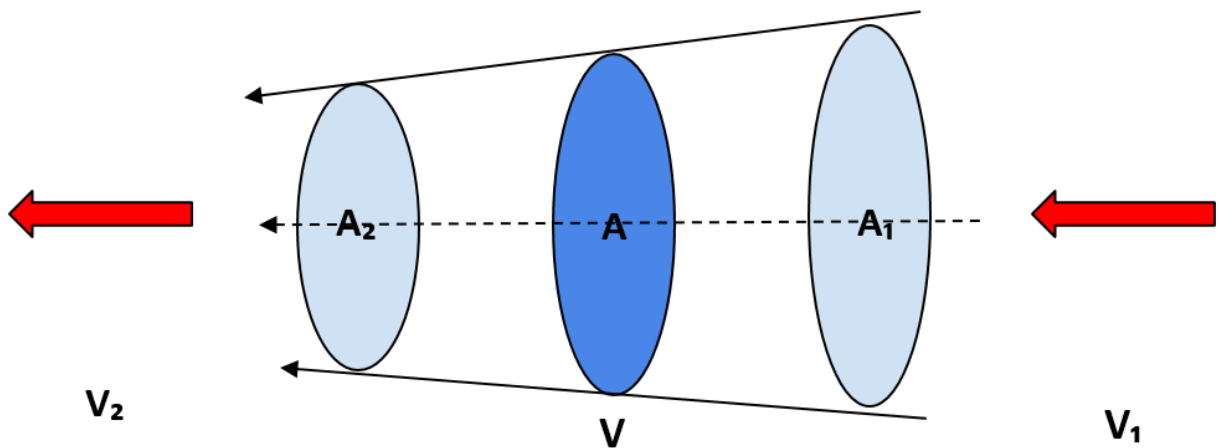
Na jednej trzeciej obszaru Polski występują warunki wybitnie i bardzo korzystne. Ponad połowa obszaru kraju posiada strefy korzystne. Można stwierdzić, że w Polsce panują dobre warunki do inwestowania w energię wiatrową. Z drugiej strony, jeśli spojrzeć na moce wiatrowe w Polsce przypadające na tysiąc mieszkańców, można stwierdzić, że są one dwukrotnie niższe niż średnia w UE zarówno w relacji do powierzchni kraju (18,9 do 36,2 MW na 1 tys. km²), jak i do liczby mieszkańców (0,16 do 0,31 MW na tysiąc mieszkańców)⁸³.

Należy jednak pamiętać, że przy rozpatrywanych generatorach bardzo ważne jest ukształtowanie terenu oraz jego pokrycie naturalnymi, czy sztucznymi przeszkodami. Charakterystyka pokrycia definiowana jest przez szorstkość terenu. Jej wpływ na siłę i kierunek wiatru zanika dopiero na wysokości około 1km. W przypadku lotnisk można mówić o zerowej klasie szorstkości ze względu na płaskość i wolną od przeszkód terenowych przestrzeń. Takie uwarunkowania są korzystne dla zastosowania mikroelektrowni wiatrowych, ponieważ są one montowane na niskiej wysokości, nad

⁸³ 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>; wejście 06.05.21

powierzchnią terenu. Dla terenów silnie zurbanizowanych klasa szorstkości jest najwyższa i wynosi 4 (w 5 stopniowej skali).

Biorąc pod uwagę dobór konstrukcji elektrowni wiatrowej najważniejsze jest przeanalizowanie prędkości wiatru w lokalizacji portu lotniczego. To jego parametry mają największy wpływ na dobór turbiny. Schemat pogładowy turbiny wiatrowej przedstawiono na rysunku 26.



Rysunek 26 Schemat pogładowy turbiny (opracowanie własne)

Na schemacie tym poszczególne oznaczenia to:

A - powierzchnia przez którą przepływa strumień powietrza (zakreślana przez wirnik) w m^2 ;

A_1 - powierzchnia strugi powietrza przed wirnikiem w m^2 ;

A_2 - powierzchnia strugi powietrza za wirnikiem w m^2 ;

V - prędkość wiatru przepływającego przez wirnik m/s

V_1 - prędkość wiatru przed wirnikiem turbiny w m/s;

V_2 - prędkość wiatru za wirnikiem turbiny w m/s;

Prędkość wiatru na wirniku jest równa średniej z prędkości wiatru na wejściu i wyjściu strugi powietrza z turbiny:

$$V = \frac{1}{2}(V_1 - V_2) \quad (1.4.1)$$

Można to stosunkowo łatwo wykazać. Z zasady zachowania masy wynika, że jest ona jednakowa na wszystkich etapach przejścia strugi powietrza przez turbinę, stąd:

$$m = \rho \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho \cdot A \cdot V = \rho \cdot A_2 \cdot V_2 \quad (1.4.2)$$

gdzie ρ -gęstość powietrza w kg/m^3 . Siła oddziaływania strumienia powietrza na wirnik to:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot \Delta V = \rho \cdot A \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.4.3)$$

Wykorzystując związki między pracą, mocą oraz siłą można zapisać następujące równania:

$$\left. \begin{aligned} dE &= F \cdot dx \\ P &= \frac{dE}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow P = F \frac{dx}{dt} = FV \quad (1.4.4)$$

Wykorzystując wzór na siłę (1.4.3) i podstawiając do (1.4.4) uzyskujemy:

$$P = \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.4.5)$$

Do obliczenia mocy wiatru można zastosować wzór na energię kinetyczną, stąd otrzymujemy następującą zależność:

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \\ P &= \frac{\Delta E}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \Rightarrow P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.4.6)$$

Zestawiając moc z równania (1.4.5) i (1.4.6) otrzymujemy:

$$\rho \cdot A \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.4.7)$$

$$V \cdot (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \Rightarrow V = \frac{1}{2} \cdot (V_1 + V_2) \quad (1.4.8)$$

Biorąc pod uwagę zależność między prędkością wiatru na wejściu i wyjściu turbiny do prędkości jego strumienia na turbinie oraz wzór na moc (1.4.6), można powiedzieć, że moc strumienia wiatru na turbinie przedstawia się następująco:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \cdot (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.4.9)$$

a po przekształceniach

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3 \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 \right) \quad (1.4.10)$$

Stosunek prędkości wiatru przed wirnikiem V_1 do prędkości wiatru za wirnikiem V_2 to współczynnik wyhamowania strumienia powietrza w turbinie.

Wzór (1.4.10) składa się z części opisującej moc wiatru i współczynnika mocy, który w literaturze nosi nazwę prawa Betza i oznaczany jest jako C_p . Określa on stosunek mocy turbiny do teoretycznej mocy zawartej w wietrze. Parametr ten zależy głównie od typu i konstrukcji turbiny wiatrowej (np. liczba płatów wirnika i ich kształt). Na ten parametr ma również wpływ chwilowa prędkość wiatru⁸⁴. Na podstawie (1.4.9) i (1.4.10) współczynnik ten można zapisać:

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot \left(\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 \right) \right) = \frac{P_w}{P_o} \quad (1.4.11)$$

Maksymalna wartość współczynnika uzyskiwana jest przy współczynniku wyhamowania $\frac{1}{3}$ i wynosi 0,593. W praktyce nie przekracza ona wartości 0,4. Wynika to ze strat aerodynamicznych turbiny wiatrowej, zależnych od sposobu wykonania, kształtu wirnika i liczby łopat⁸⁵.

Istotnym parametrem turbiny wiatrowej jest szybkobieżność, która określa zależność prędkości liniowej końcówki łopaty, do prędkości wiatru przed wirnikiem. Można ją opisać następującym wzorem:

$$\lambda = \frac{0,5 \cdot R \cdot \omega}{V_1} \quad (1.4.12)$$

gdzie:

ω - prędkość kątowna wirnika;

R - promień koła zataczanego przez wirnik;

V_1 - prędkość wiatru przed wirnikiem turbiny w m/s.

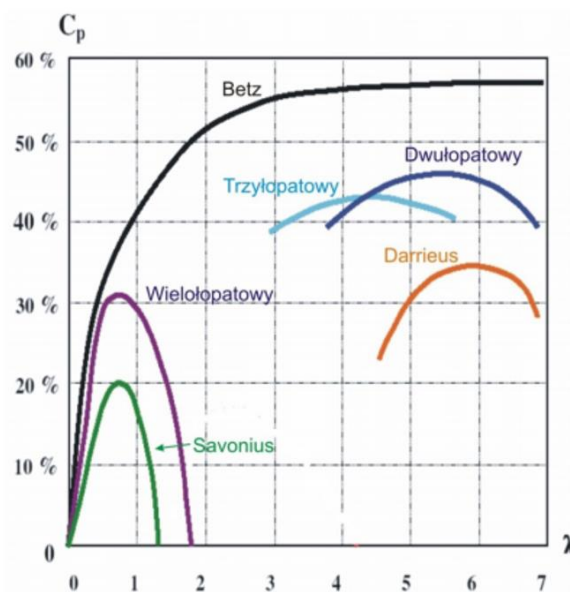
Zależność przebiegu współczynnika C_p w funkcji szybkobieżności najlepiej oddaje sprawność turbin. Rys. 27 poniżej ilustruje tę zależność⁸⁶. Wynika z niej, że energię wiatru najlepiej wykorzystuje turbina wiatrowa dwupłatowa o poziomej osi obrotu, a najgorszą charakterystykę ma turbina Savoniusa o pionowej osi obrotu.

⁸⁴ 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. str. 8

⁸⁵ Karolewski Bogusław . “Obliczanie parametrów małej elektrowni wiatrowej”. elektro.info 6/2014; <https://www.elektro.info.pl/artukul/napedy-i-sterowanie/57677,obliczanie-parametrow-malej-elektrowni-wiatrowej; wejście 17.05.21>

⁸⁶ 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. Str. 9

Reasumując należy stwierdzić, że wykorzystanie wiatru jako źródła energii odnawialnej w portach lotniczych nie jest łatwe. Jej zastosowanie ograniczają warunki bezpieczeństwa lotów w przestrzeni wokół portu lotniczego, co niemal ogranicza do zera stawianie wysokich turbin wiatrowych w rejonie lotniska. Jediną możliwością jest zastosowanie mikroturbin powiązanych z obiektami budowlanymi lotniska. W większości przypadków ich zastosowanie wymaga jednak uwzględnienia tego typu konstrukcji na etapie projektowania portu lotniczego (turbiny zintegrowane i rozwiązania zwiększające przepływ powietrza), a ich funkcja (ze względu na duże zapotrzebowanie na moc w terminalach) będzie raczej uzupełniająca w stosunku do innych wykorzystywanych źródeł energii. Dla istniejących obiektów można rozważać jedynie turbiny zamontowane na budynku. Należy rozważyć zastosowanie układów hybrydowych łącząc np. energię wiatrową i słoneczną. Efektywność tego rozwiązania może być podniesiona poprzez wykorzystanie coraz bardziej rozwijanej technologii magazynów energii.



Rys. 27 Zależność współczynnika mocy C_p od szybkości λ turbin wiatrowych⁸⁶.

Na rys. 28 poniżej zaprezentowano przykłady stosunkowo rzadkich zastosowań

energii wiatrowej na lotniskach⁸⁷. Doskonale widać, że w żadnym z przedstawionych przykładów rozwiązanie z zastosowaniem turbin wiatrowych jest jedynie uzupełnieniem zabezpieczającym część zapotrzebowania na energię portu lotniczego.



Boston Logan International Airport, US
20 x turbina 1kW; 2,2 tys kWh rocznie
2% zapotrzebowania na energię



Burlington International Airport, US
1 x turbina 100 kW; 175 tys. kWh rocznie
15% zapotrzebowania na energię



East Midlands International Airport, UK
2 x turbina 250 kW; 563 MWh rocznie
6% zapotrzebowania na energię

Rys. 28 Przykłady zastosowania turbin wiatrowych w portach lotniczych (na podstawie⁸⁷)

Zestawy tych turbin są wykorzystywane na niewielu lotniskach. Te małe systemy wiatrowe mają potencjał jako rozproszone źródła energii i odnoszą się do różnych modułowych technologii, które można łączyć w systemy.

1.5 Zastosowanie energii wodnej w portach lotniczych

Hydroelektrownie są obecnie największym producentem energii ze źródeł odnawialnych. Jak wspomniano wcześniej wykorzystanie tego źródła energii w portach

⁸⁷ 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>.

lotniczych jest bardzo ograniczone głównie ze względu na konieczność lokalizacji tego typu obiektu w pobliżu rzek lub akwenów morskich. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem są zapory wodne, które poprzez spiętrzenie wody wykorzystują jej grawitacyjne oddziaływanie na turbiny generatora prądu elektrycznego. Przewaga tego rozwiązania nad energią wiatrową i słoneczną jest to możliwość pełnej kontroli źródła generacji poprzez spiętrzanie i regulowanie upustu wody. Jednak budowa tego typu obiektów ma negatywny wpływ na otaczające środowisko naturalne. Jego implementacja na potrzeby obiektu typu port lotniczy jest zbyt kosztowna i obciążona ogromnym ryzykiem uzyskania efektywności takiego rozwiązania. Podobne ryzyka związane są z uzyskiwaniem energii na potrzeby portu lotniczego z fal morskich lub pływów. Raczej nie stosuje się tego typu rozwiązań do zasilania obiektowego. Technologia wykorzystania energii z fal morskich jest nadal we wczesnym stadium rozwoju i tylko kilka krajów posiada w tym zakresie zaawansowane rozwiązania. Biorąc pod uwagę ogrom energii zgromadzonej w oceanach nie można wykluczyć w niedalekiej przyszłości możliwości wykorzystania jej do zasilania dogodnie położonych portów lotniczych.

W przypadku energii pływów morskich generacja odbywa się podobnie jak w hydroelektrowniach. Specjalne turbiny są lokowane w miejscach określanych jako wloty przyprływu/odprływu. Są one przystosowane do pracy w obu kierunkach przepływu strumienia wody. Energię można również w podobny sposób uzyskiwać z prądów morskich. Te technologie również nie są zbyt mocno zaawansowane i nie będą miały zastosowania w portach lotniczych jeszcze przez wiele lat. Na rys. 29 pokazano przykłady konwertera energii fal morskich w energię elektryczną (opracowanego

w Massachusetts USA) oraz turbinę wykorzystywaną do uzyskiwania energii z pływów morskich (Lubec, Maine USA)⁸⁸.



KONWERTER FAL MORSKICH



TURBINA PŁYWÓW MORSKICH

Rys. 29 Przykłady rozwiązań wykorzystujących energii akwenów morskich⁸⁸

1.6 Zastosowanie energii geotermalnej w portach lotniczych

Technologie geotermalne bazują na wykorzystaniu ciepła Ziemi. Wykorzystanie tej energii uzależnione jest od specyficznych warunków geograficznych. Zwykle porty lotnicze mają teren wystarczająco rozległy do budowy tego typu obiektu. Jednak zastosowanie geotermii na potrzeby portów lotniczych jest niezwykle trudne i kosztowne, stąd raczej rzadko stosowane. Projekty tego typu mają sens ekonomiczny wyłącznie w przypadku budowy dużych instalacji włączonych w krajową sieć przesyłowo-dystrybucyjną.

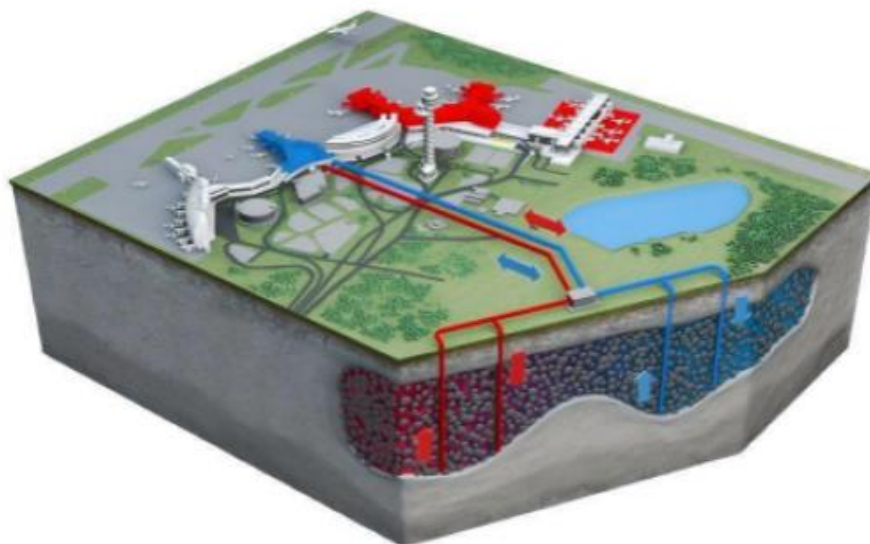
Znacznie częściej wykorzystywane są geotermalne pompy ciepła, które mogą mieć zastosowanie praktycznie bez ograniczeń geograficznych i doskonale wpisują się w zasilanie obiektowe oraz do podgrzewania płaszczyzn roboczych lotnisk. Pompy ciepła wykorzystują stałą temperaturę Ziemi pod powierzchnią gruntu do chłodzenia lub ogrzewania. Nie dostarczają one energii elektrycznej, ale mają wpływ na efektywność energetyczną obiektów. Użyte w celu chłodzenia praktycznie zastępują potrzebę generacji prądu do układów klimatyzacji. Zimą znacznie redukują koszty ogrzewania,

⁸⁸ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2015. Renewable Energy as an Airport Revenue Source. Washington, DC: The National Academies Press. <http://nap.edu/22139>. str. 23-24

ponieważ geotermia daje tzw. ogrzewanie wstępne, a dodatkowa energia (głównie elektryczna) niezbędna jest jedynie do ewentualnego sterowania systemem i podniesienia temperatury do oczekiwanego poziomu. Inwestycja w tego typu instalacje jest znacznie kosztowniejsza od konwencjonalnych systemów ogrzewania i chłodzenia. Efektywny system wymaga wykonania odwiertów na głębokość 100 do 150 metrów. Korzyści pojawiają się przy długotrwałej eksploatacji. Szacuje się, że ogólny zysk (oszczędność) z wykorzystania tego rozwiązania wynosi od 20 do 60% w stosunku do instalacji konwencjonalnej, w zależności od rodzaju zastosowanej pompy ciepła. Najlepsze efekty można uzyskać w portach lotniczych leżących w strefach wymagających stałego ogrzewania lub chłodzenia wewnątrz.

Zastosowanie tych rozwiązań jest najbardziej opłacalne na etapie budowy nowych obiektów lotniskowych lub głębokiej ich modernizacji, bowiem wymagają konstrukcji nowych systemów dystrybucji ciepła wewnątrz samych budynków.

Na rys. 30 zaprezentowano przykład lotniska europejskiego, na którym zainstalowano geotermalne pompy ciepła⁸⁹.



Rys. 30 Przykład zastosowania geotermalnych pomp ciepła na lotnisku Sztokholm Arlanda Airport Szwecja⁸⁹

⁸⁹ 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, wejście 21.05.21

Zastosowany w tym przypadku system magazynowania energii cieplnej typu ATES wykorzystuje naturalne warstwy wodonośne i składa się z 11 studni z przepływem wody na poziomie 720 m³/godz. Pojemność cieplna wynosi 10 GWh/rok. Analiza projektowa pokazała oszczędności energii na poziomie 4 GWh/rok energii elektrycznej i 10 GWh/rok ciepła. Rozwiązanie tego typu również wykorzystywane jest do topienia warstwy śniegu i lodu na obszarze technicznym lotniska.

1.7 Zastosowanie biomasy jako źródła energii w portach lotniczych

Biomasa to surowiec naturalny organiczny pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego. Rośliny magazynują energię słoneczną, która następnie jest pokarmem dla zwierząt. Energia ta uwalniana jest stopniowo poprzez rozkład. Można ten proces przyspieszyć procesem spalania, który również zwiększa uwalnianie dwutlenku węgla zgromadzonego w materiale roślinnym. Ze względu na naturalność zachodzących procesów oraz ich powtarzalność uznaje się, że biomasa jest źródłem odnawialnym.

W przypadku portów lotniczych efekt w postaci ograniczenia zapotrzebowania na prąd z sieci może być uzyskany poprzez wykorzystanie materiału roślinnego na rozległych terenach lotniska, lub zastosowanie lokalnych odpadów pochodzenia roślinnego do spalania (np. odpady z lokalnej produkcji leśnej, uprawy roślinne, odchody zwierzęce, czy ścieki). Zwykle w takich przypadkach jest to tanie źródło energii, ponieważ jest ono położone blisko portu lotniczego (niski koszt transportu) i relatywnie tanie ze względu na potencjalne koszty jego utylizacji przez producentów. Zastosowanie biomasy wymaga budowy miejsc przechowywania surowca na terenie lotniska oraz dróg dojazdowych dla środków transportu.

Mimo, iż efektem spalania jest dwutlenek węgla, to uznaje się, że cykl życia biomasy od jej wzrostu do spalania jest neutralny pod tym względem dla środowiska. Rosnące rośliny absorbują dwutlenek węgla z atmosfery w ramach fotosyntezy. Ważne jest, aby ten cykl życia biomasy był wystarczający do zapewnienia stałego dopływu surowca, z którego wytwarzana jest energia niezbędna do zasilania instalacji.

Efektem spalania może być energia elektryczna lub cieplna. Rezultatem procesów rozkładu biomasy jest biogaz, który w procesie spalania może również

wytwarzać elektryczność lub ciepło. Najczęstszą formą biogazu jest metan uwalniany ze starych wysypisk, a wytwarzany przez urządzenia do fermentacji beztlenowej zasilanej odpadami żywnościowymi.

W procesie produkcji energii elektrycznej biomasa jest spalana celem podgrzania wody i wytworzenia pary wodnej wprawiającej w ruch turbiny (generatory) parowe. Jeśli wytwarzane w tym procesie przy okazji ciepło odpadowe, można wykorzystać jako źródło ogrzewania wody do systemów ogrzewania, to możemy mówić o kogeneracji.

Zaletą biomasy jest to, że jest ona wykorzystywana w podobny sposób jak inne paliwa w rozwiązaniach konwencjonalnych. Dlatego stosunkowo łatwo wymienić istniejące kotły na te zasilane biomasą.

Zastosowanie biomasy w portach lotniczych nie jest powszechne. Jej zastosowanie wynikać może ze specyficznego położenia w pobliżu źródła oraz czynników ekonomicznych uzasadniających wykorzystanie tej formy pozyskania energii w danej lokalizacji. Jest to dobre rozwiązanie dla małych portów lotniczych, szukających tańszych rozwiązań do ogrzewania niż opartych na oleju, czy propanie.

Na rys. 31 poniżej przedstawiono dwa przykłady zastosowania tego typu rozwiązań na lotnisku w USA⁹⁰ i w Kanadzie⁹¹.



YELLOWKNIFE AIRPORT CANADA



GRANT COUNTY REGIONAL AIRPORT US

Rys. 31 Przykłady instalacji na biomasę zainstalowanych w portach lotniczych

⁹⁰ Renewable Energy for Aviation. Practical applications to achieve carbon reductions and cost savings. www.icao.int/.../Documents/ICAO_UNDP_GEF_RenewableEnergyGuidance.pdf

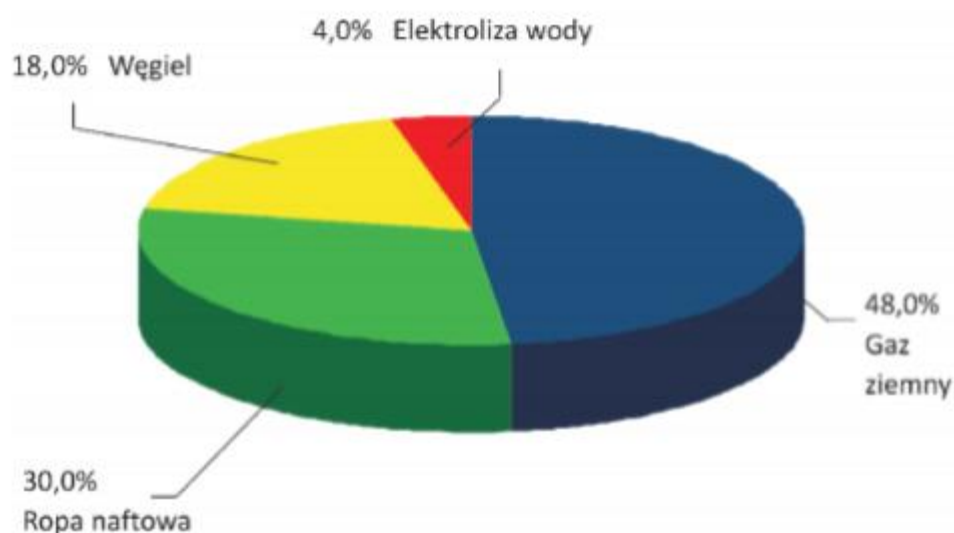
⁹¹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2015. Renewable Energy as an Airport Revenue Source. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22139>.

1.8 Wykorzystanie ogniw wodorowych do zasilania portów lotniczych

Ogniwa wodorowe są nową technologią, wciąż rozwijaną, ale bardzo perspektywiczną. Generują one energię elektryczną w ramach reakcji chemicznej spalania między paliwem (wodór) a środkiem utleniającym takim jak tlen. Wodór sporadycznie występuje w naturze w formie, która nadaje się do wykorzystania w ogniwach. Z tego względu trzeba go wytwarzać w inny sposób. Do tej pory wodór był klasyfikowany ze względu na źródło wykorzystane do jego produkcji:

- wodór zielony z odnawialnych źródeł energii (w ramach elektrolizy z wody);
- wodór niebieski i turkusowy z gazu ziemnego (uzyskiwany w ramach tzw. reformingu parowego - w wyniku procesu powstaje szkodliwy dla środowiska tlenek węgla, ale w znacznie mniejszej ilości niż z ropy, czy węgla);
- wodór fioletowy z atomu;
- wodór szary z rafinerii
- wodór czarny z węgla.

Udział poszczególnych surowców w produkcji wodoru pokazuje rys. 32⁹². Widać z niego, że największym źródłem wodoru jest ogólnie dostępny gaz ziemny. Dostęp do taniego gazu w rejonie lotniska może decydować o zastosowaniu ogniw wodorowych.



Rys. 32 Udział surowców w produkcji wodoru⁹²

⁹² Demusiak G. Otrzymywanie paliwa wodorowego metodą reformowania gazu ziemnego dla ogniw 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>; wejście 21.05.21

Niewątpliwą zaletą produkcji energii z ogniw wodorowych jest brak ograniczeń geograficznych w jego zastosowaniu, stąd potencjalnie może być powszechnie wykorzystywane w portach lotniczych na całym świecie.

Elementarne ogniwo paliwowe składa się z katody, anody i elektrolitu. Anoda zasilana jest wodorem, a do katody dopływa utleniacz (powietrze lub tlen). Główną reakcją w ogniwach jest elektrochemiczna synteza wody bezpośrednio z wodoru i tlenu:



W literaturze przyjętą się podział ogniw paliwowych ze względu na rodzaj używanego elektrolitu. Rozróżnia się cztery podstawowe typy ogniw paliwowych⁹³:

- ogniwo fosforowe PAFC (ang. *Phosphoric Acid Fuel Cell*);
- ogniwo węglanowe MCFC (ang. *Molten Carbonate Fuel Cell*);
- ogniwo tlenkowe SOFC (ang. *Solid Oxide Fuel Cell*);
- ogniwo polimerowe PEMFC (ang. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*), PEFC (ang. *Polymer Electrolyte Fuel Cell*), SPEMFC (ang. *Solid Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*).

Ponadto wyróżnia się ogniwa alkaliczne AFC (ang. *Alkaline Fuel Cell*) oraz ogniwa metanolowe z bezpośrednim zasilaniem DMFC (ang. *Direct Methanol Fuel Cell*), stanowiące podgrupę ogniw PEMFC. Przykłady ogniw pokazano na rys. 33⁹⁴.

Ogniwa wodorowe mają już dość szerokie zastosowanie głównie jako zasilanie awaryjne (tzw. *backup power*) głównie w centrach łączności, pojazdach lub statkach kosmicznych. Tego typu źródła o mocy od 1 do 10KW mają zastosowanie na niektórych lotniskach, jako systemy awaryjnego zasilania oświetlenia pasów startowych. Na chwilę obecną szersze wykorzystanie ogniw paliwowych ma wiele ograniczeń. Jednym z nich jest to, że reakcja w ogniwie zachodzi przy wysokiej temperaturze i potrzebny jest system chłodzenia. W przyszłości energię cieplną wytwarzaną jako produkt uboczny reakcji ogniwa można wykorzystać do ogrzewania obiektów lotniskowych, stosując typową kogenerację lub wytworzoną parą wodną napędzać turbiny gazowe dodatkowo zwiększając efektywność całego systemu.

⁹³ Małek A. Wendeker M. Ogniwa paliwowe typu PEM teoria i praktyka. Politechnika Lubelska. Lublin 2010. ISBN: 978-83-62596-08-9. str. 12

⁹⁴ Fuel Cell & Hydrogen Association. Fuel Cell Basics. <https://www.fchea.org/fuelcells>; wejście 22.05.21

Obecnie najbardziej obiecującym i najintensywniej rozwijanym typem ogniwa paliwowego jest ogniwo PEM zasilane czystym wodorem lub paliwem węglowodorowym poddanym reformingowi. Z tym drugim wiąże się groźne zanieczyszczenie paliwa wodorowego związkami siarki.

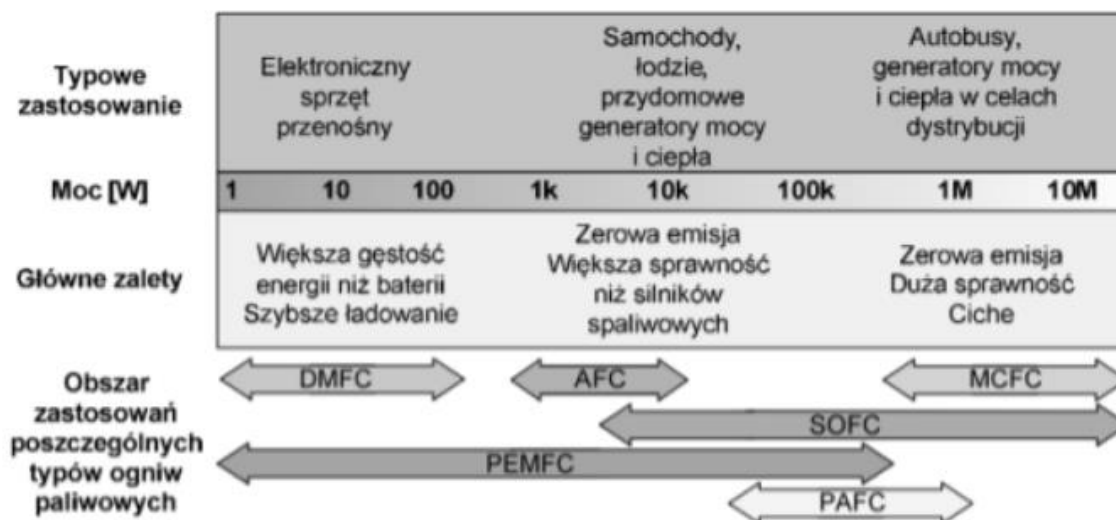


Rys. 33 Przykłady ogniw wodorowych różnego typu - 1 PEMFC, 2 AFC, 3 MC FC, 4 PAFC, 5 DMFC, 6 SOFC (źródło⁹⁴)

Zawartość związków siarki w gazie, dystrybuowanym w Polsce jest na tyle wysoka, że uzyskane paliwo wodorowe może uszkodzić zarówno ogniwa PEM, jak

i SOFC⁹⁵. Konieczne jest zatem oczyszczanie gazu zasilającego ogniwo. Rys. 34⁹⁶ pokazuje możliwości zastosowania różnych typów ogniw paliwowych.

Jeśli wodór jako paliwo do zasilania ogniw byłby wytwarzany na miejscu (w porcie lotniczym), wtedy nie ma potrzeby budowy instalacji do jego przechowywania, ale niezbędna jest energia z innych źródeł do podtrzymania procesu.



Rys. 34 Możliwości zastosowania poszczególnych typów ogniw wodorowych⁹⁶

W przypadku, gdy mówimy o zielonym wodorze uzyskiwanym z wody w ramach elektrolizy, to musimy pamiętać, że ten proces jest drogi, nieefektywny i wymaga dużej ilości energii. W przypadku potrzeby dowozu paliwa wodorowego i przechowywania na terenie lotniska mogłoby to nieść różnego rodzaju ograniczenia (wodór tworzy silnie wybuchową mieszkankę w połączeniu z powietrzem), stąd konieczność ustanowienia np. stref bezpieczeństwa. Wodór do celów komercyjnych może być przechowywany na trzy sposoby i każdy z nich jest dość kłopotliwy:

- jako gaz skompresowany wymaga bardzo dużych zbiorników wysokociśnieniowych;
- wodór w postaci płynnej wymaga przechowywania w warunkach kriogenicznych (ekstremalnie niskie temperatury wynoszące około -250°C), co

⁹⁵ Demusiak G. Otrzymywanie paliwa wodorowego metodą reformowania gazu ziemnego dla ogniw 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>; wejście 21.05.21

⁹⁶ Małek A. Wendeker M. Ogniwa paliwowe typu PEM teoria i praktyka. Politechnika Lubelska. Lublin 2010. ISBN: 978-83-62596-08-9. str. 9

jest rozwiązaniem drożym (koszt skraplania wynosi około 40% wartości paliwa), a dystrybucja wiąże się ze stratami szacowanymi na 10-25%;

- jako rozpuszczony gaz w układzie wodorku metalu, który jest najbezpieczniejszy, ale reprezentuje najmniejszą masową gęstość energii (jest bardzo ciężki, ale wydajnie przechowuje się w małej objętości).

Zaletą ogniw paliwowych jest możliwość regulacji ich mocy poprzez zmiany ilości podawanego paliwa wodorowego. Efektywność tego źródła energii jest wyższa w odniesieniu do rozwiązań konwencjonalnych i dla większości rodzajów ogniw wynosi ona ponad 40%, a w niektórych przypadkach nawet od 50 do 55%. Ich wykorzystanie jako źródeł zapasowego zasilania jest porównywalne do agregatów zasilanych ropą lub gazem, ze względu na zasilanie paliwem w postaci wodoru i krótki czas niezbędny do ich uruchomienia. Użyte jako baterie mają tę przewagę nad akumulatorami, że ich energia nie ulega wyczerpaniu tak długo, jak długo będzie dostarczane paliwo. Kilka portów lotniczych w USA (np. Międzynarodowy Port Lotniczy w Memphis) wykorzystuje stacjonarne ogniwa wodorowe do zasilania awaryjnego w ramach własnej mikrosieci). W Memphis prowadzony jest również przez Departament Energii USA projekt polegający na wdrożeniu do eksploatacji 10 zasilanych ogniwami wodorowymi ciągników do transportu bagaży. Instalacja do dystrybucji paliwa wodorowego oraz ciągnik pokazane są na rys. 35⁹⁷.



Rys. 35 Ciągnik na ogniwo wodorowe i instalacja do dystrybucji paliwa wodorowego w Memphis⁹⁷

Ogniwa paliwowe przy wykorzystaniu kogeneracji mogą osiągnąć bardzo wysoką sprawność, są ciche, niezawodne i mogą mieć mniejsze rozmiary niż inne typy generatorów. Są jednak nadal bardzo drogie, ze względu na wysoki koszt katalizatorów, w których stosuje się platynę. Ich trwałość nie jest jeszcze zadowalająca. Produkcja

⁹⁷ 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; wejście 23.05.21

wodoru wciąż nie jest powszechna i tania, a infrastruktura do jego produkcji i przechowywania jest na stosunkowo niskim poziomie rozwoju. Wiele technologii nie zostało jeszcze zweryfikowanych w praktyce.

Zgodnie z projektem przygotowanym dla Centrum Eksperymentalnego EUROCONTROL przez firmę GAES Extern⁹⁸, ogniwa paliwowe mogą mieć następujące zastosowanie w lotnictwie:

- jako pomocnicze zasilanie samolotów (APU - *Aircraft Auxiliary 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).

Z opracowania wynika, że dwa lotniska na świecie podjęły się wdrożenia kompleksowego projektu zastosowania ogniw wodorowych w pojazdach i sprzęcie obsługi lotniska. Jednym z nich jest port lotniczy w Monachium, a drugi w Los Angeles. Niemcy wystartowali z projektem już w 1997 r., a Amerykanie w 2004. Z raportu wynikają następujące wnioski dotyczące wykorzystania ogniw wodorowych w tym obszarze:

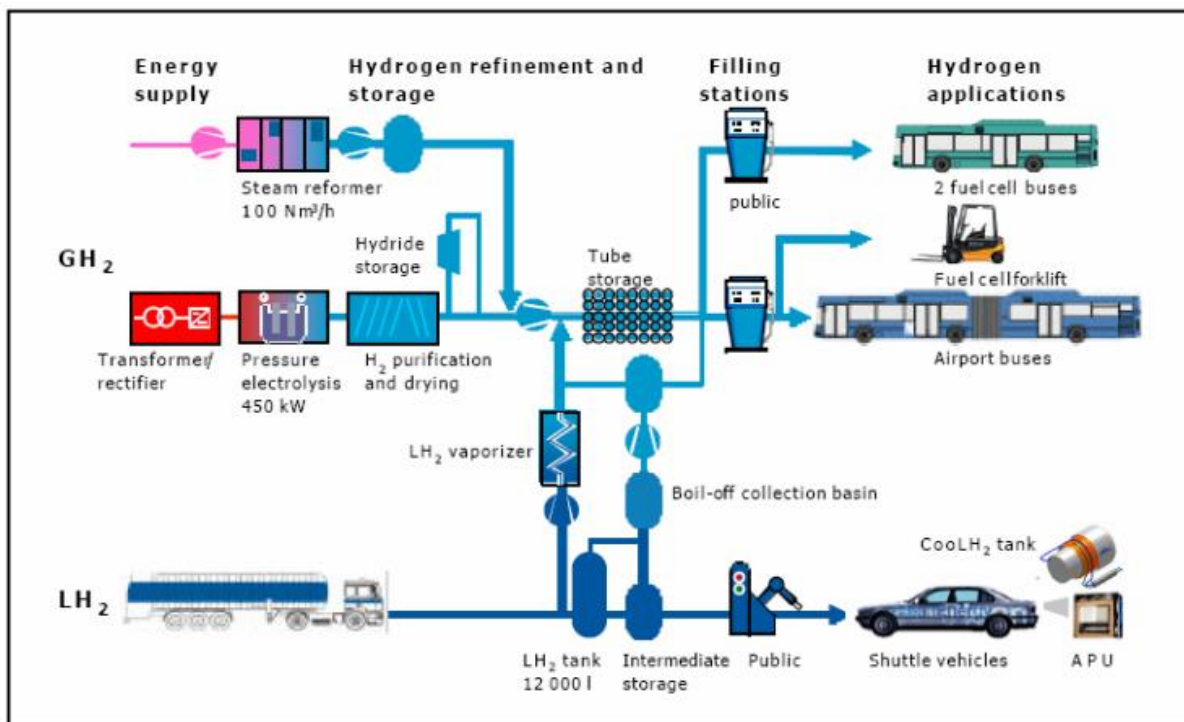
- technologia jest gotowa do wdrożenia;
- spełnia wymogi bezpieczeństwa;
- możliwe jest wykorzystanie ogniw wodorowych w cyklu zamkniętym w ramach portu lotniczego;
- rozwiązanie spotkało się z aprobatą społeczną.

Rys. 36 poniżej ilustruje schemat poglądowy projektu niemieckiego.

Koncentrując się na zasilaniu infrastruktury lotniskowej należy brać pod uwagę ogniwa dużej mocy od 250 kW do 10 MW. Jak widać na wcześniejszym rys. 34, do tych rozwiązań najlepiej nadają się ogniwa typu PAFC, MCFC i SOFC. Dowodem na ich potencjał są dotychczasowe praktyczne zastosowania.

⁹⁸ 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; wejście 23.05.21

Największą elektrownią o mocy 59 MW opartą na ogniwach wodorowych zbudowano w Korei Południowej (rys. 37)⁹⁹.



Rys. 36 Schemat poglądowy projektu zastosowania ogni wodorowych w porcie lotniczym w Monachium⁹⁸.



Rys. 37 Największy park ogni wodorowych na świecie w Korei Południowej⁹⁹

Reasumując, przy obecnie rozwiniętej technologii i słabym dostępie do naturalnego wodoru nie do końca można uznać, że jest to w pełni ekologiczne źródło energii. Niemniej jednak intensywne prace rozwojowe mogą sprawić, że negatywne

⁹⁹ 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/>; wejście 22.05.21

cechy tego źródła energii zostaną w niedalekiej przyszłości usunięte, co pozwoli na szersze zastosowanie tego typu rozwiązania w portach lotniczych.

1.9 Zastosowanie mikrosieci w portach lotniczych

Zastosowanie w porcie lotniczym kombinacji własnych źródeł generowania energii elektrycznej oraz własnych, lokalnych systemów jej magazynowania, jako uzupełnienia do istniejących przyłączy do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej, wymaga wdrożenia mechanizmów zarządzania. Do tego celu służą mikrosieci. Ułatwiają one 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. Źródła można podzielić na sterowalne – o przewidywalnej i sterowalnej mocy (ogniwa paliwowe, agregaty prądotwórcze) oraz niesterowalne – o nieprzewidywalnej mocy (ogniwa słoneczne i turbiny wiatrowe). Mikrosieć pozwala obniżyć koszty funkcjonowania portu lotniczego poprzez właściwe zarządzanie poborem mocy ze źródeł wewnętrznych (w pierwszej kolejności tych najtańszych - systemy solarne i wiatrowe) oraz utrzymywać optymalne parametry pracy dla każdego ze źródeł. W ten sposób redukuje się zapotrzebowanie na moc od operatora zewnętrznego lub poprzez usługę wsparcia tegoż operatora na jego wniosek przesyła się energię do sieci dystrybucyjnej.

Najważniejszą cechą mikrosieci jest zdolność do zarządzania dystrybucją i potrzebami zasilania w energię wewnątrz portu lotniczego. W ramach tego procesu pozwala na skoncentrowanie dostępnej energii na jego krytycznych funkcjonalnościach, biorąc pod uwagę priorytety oraz bezpieczeństwo operacji lotniczych w przypadku odcięcia od zewnętrznej sieci dystrybucyjnej.

Niezależnie od powyższego, budowa zdecentralizowanego systemu mikrosieci ma sens biorąc pod uwagę fakt stałego wzrostu zapotrzebowania na energię oraz strat wynikających z transferu energii na duże odległości liniami przesyłowymi. Ocenia się, że około 15% tej energii ulatnia się w tym procesie w postaci ciepła, Stąd mówi się już

nie o dużych mikrosieciach, a o ich federacji powiązanej ze sobą na poziomie tzw. chmury, w celu dystrybuowania energii¹⁰⁰.

Mikrosieci można podzielić na dwa zasadnicze typy:

- przyłączone do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej (mogą współpracować z siecią zewnętrzną poprzez punkt dostępowy lub działać samodzielnie);
- działające autonomiczne (systemy wyspowe).

Ze względu na strukturę wewnętrzną i złożoność można je podzielić na¹⁰¹:

- podstawowe (prosty system nadzorowania i bilansowania energii);
- średnio złożone (zaawansowane systemy zarządzania, elementy prognozowania, priorytyzacja rozkładu obciążeń);
- zaawansowane (wykorzystanie elementów sztucznej inteligencji, zaawansowane systemy wymiany danych z urządzeniami odbiorczymi i siecią zewnętrzną).

Biorąc pod uwagę metodę przesyłania energii można je podzielić na¹⁰²:

- mikrosieci prądu przemiennego AC;
- mikrosieci prądu stałego DC;
- mikrosieci hybrydowe AC/DC.

Mikrosieć AC jest rozwiązaniem bardziej przystępnym, ponieważ wykorzystuje istniejącą i stosunkowo taną infrastrukturę przesyłową i zabezpieczającą. Zdecydowana większość infrastruktury lotniczej posiada systemy zasilania awaryjnego oparte o generatory i nieskomplikowane urządzenia sterujące. W wielu przypadkach generatory te ulegają awariom w krytycznych momentach, wymagających podtrzymania zasilania przy przerwach w dostawach energii od operatora zewnętrznego. Generatory te wymagają ciągłej obsługi i utrzymywania w gotowości do użycia, są zasilane paliwami płynnymi, co wymaga organizacji systemu dystrybucji, a także są szkodliwe dla środowiska. Generatory nie są podłączone do wszystkich odbiorników, a ich moc nie jest wystarczająca do pokrycia wszystkich krytycznych

¹⁰⁰ The Financial Decision-Makers Guide to Energy-as-a-Service Microgrids. Microgrid Knowledge. Schneider Electric, Alfa Structure. p. 6

¹⁰¹ 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>. str. 7-8

¹⁰² 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.

potrzeb. Przełączanie z zasilania awaryjnego na sieciowe powoduje chwilowe zaniki mocy i konieczność restartu wielu wrażliwych systemów elektronicznych i opóźnione rozpoczęcie ich pracy, co może wpłynąć na bezpieczeństwo operacji lotniczych oraz opóźnienia w działaniu.

Mikrosieci dają możliwość stałej kontroli nad systemem zasilania i efektywnego wykorzystania wszystkich dostępnych źródeł znacznie zwiększając gwarancję nieprzerwanej pracy instalacji.

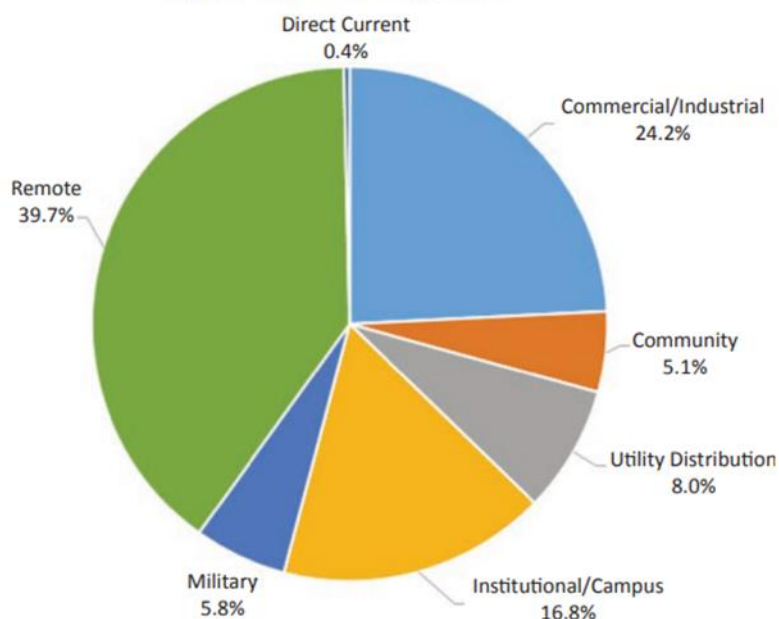
Elementem motywującym do budowy mikrosieci w portach lotniczych jest rozwój i spadek cen magazynów energii, stały trend wzrostu cen energii, przepisy kładące nacisk na niskoemisyjność, ale również zmiany klimatu i związane z tym coraz częstsze anomalie pogodowe skutkujące zniszczeniami infrastruktury przesyłowej i przerwami w dostawach energii. Porty lotnicze należy traktować jako infrastrukturę krytyczną ze względu na rolę jaką pełnią w systemie transportowym, a więc i ekonomicznym, ale również ze względu na bardzo wysokie warunki bezpieczeństwa związane z zabezpieczeniem operacji lotniczych.

Według danych z II kwartału 2017 r. zastosowanie mikrosieci w portach lotniczych ujęte jest w grupie zastosowań komercyjne/przemysłowe oraz społeczne (*commercial/industrial and community*), które obejmują 29,3% ogółu zastosowań (rys. 38).

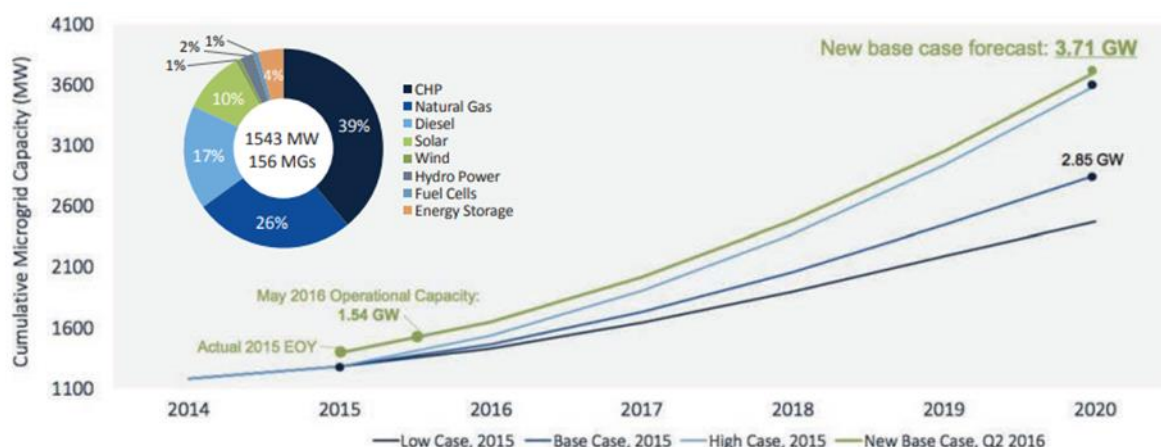
Największą moc generują mikrosieci w Ameryce Północnej (43,6%), i w Azji (35,9%). Na Europę przypada jedynie 13,9% tej mocy. Prognozuje się, że najszybszy rozwój mikrosieci wystąpi w krajach azjatyckich. W 2016 roku prognozowano, że do roku 2020 w USA Mikrosieci wytworzą 3,71 GW energii. Największy udział w generowaniu mocy w systemach będzie miała kogeneracja energii cieplnej i elektrycznej (39%), gaz (26%), olej napędowy (17%), energia słoneczna (10%) i magazyny energii (4%)¹⁰³ – rys. 39.

¹⁰³ 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>. str. 7-11.

Operational Microgrid Power Capacity by Segment, World Markets: 2Q 2017



Rys. 38 Udział produkcji energii w mikrosieciach według segmentów¹⁰³



Rys. 39 Prognoza wzrostu mocy mikrosieci w USA do 2020r oraz udział poszczególnych źródeł energii w systemach¹⁰³

Do podstawowych zalet zastosowania mikrosieci można zaliczyć:

- zapewnienie nieprzerwanego dostępu do energii elektrycznej;
- niezawodność i redundancję systemu zasilania zwiększającą 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.

Mimo wielu przedstawionych powyżej zalet trzeba pamiętać, że porty lotnicze mają dość znaczne zapotrzebowanie na energię. Sposób ich funkcjonowania wymaga dostępu do energii również w porach, kiedy generacja ze źródeł odnawialnych (np. panele PV) nie jest możliwa. Stąd potrzeba zastosowania rozwiązania hybrydowego obejmującego różne źródła, w tym magazynów energii, a w niektórych sytuacjach uzupełnienia niedoboru z sieci zewnętrznej. Ze względu na rozległość infrastruktury lotniskowej może zachodzić potrzeba budowy kilku mikrosieci połączonych z jedną zgrupowaną. Niezależnie od powyższego, układ sterujący posiada część odpowiedzialną za optymalizowanie parametrów pracy każdego źródła (część lokalną) i część odpowiedzialną za cały zintegrowany system.

Wspomniane wykorzystanie magazynów energii elektrycznej, w dużej mierze może wyeliminować wady wykorzystania generacji rozproszonej. Te magazyny mogą być wykorzystywane jako źródła energii rezerwowej.

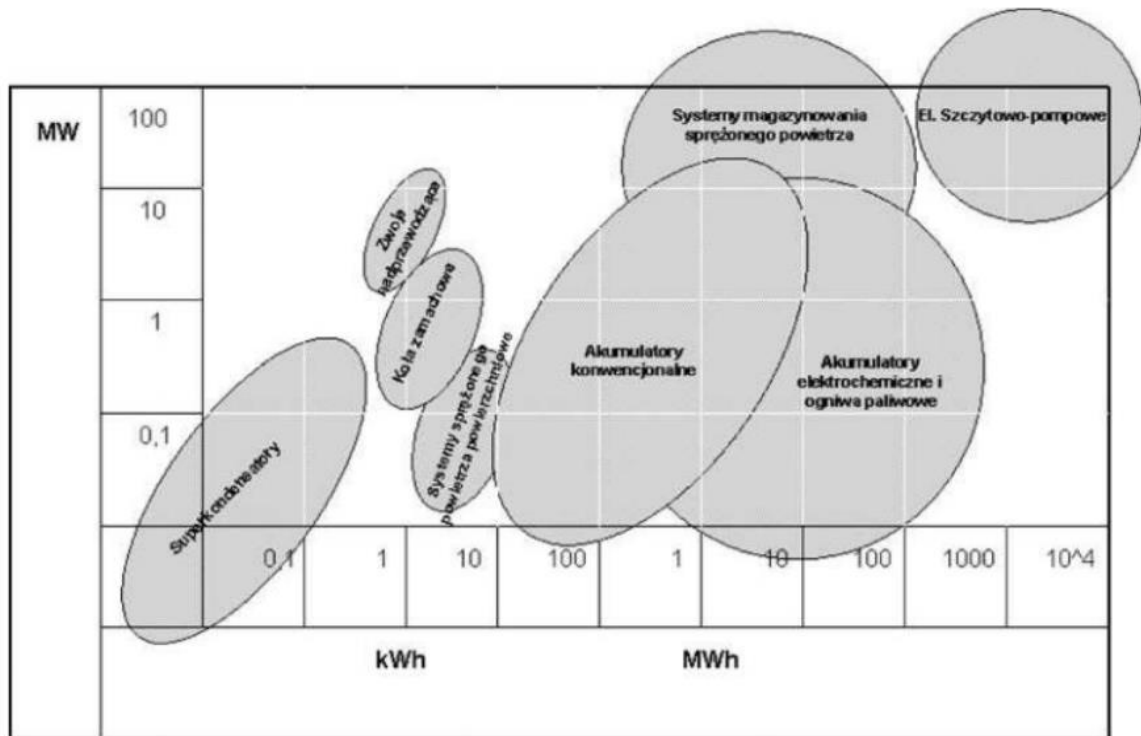
Do technologii umożliwiających magazynowanie energii elektrycznej możemy zliczyć¹⁰⁴:

- 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.

¹⁰⁴ Szczerbowski R. Ceran B. Możliwości i perspektywy magazynowania energii w generacji rozproszonej. Politechnika Poznańska. Logistyka 4/2014. str. 4955

Część z wymienionych technologii jest na etapie intensywnego rozwoju i nie ma jeszcze zbyt szerokiego zastosowania ze względu na wysoki koszt. W celu minimalizacji kosztu wytwarzania energii, zasobnik należy ładować wyłącznie nadwyżkami energii ze źródeł odnawialnych.

Na rys. 40 zaprezentowano rozkład typowych mocy i możliwości magazynowania energii elektrycznej dla wybranych technologii¹⁰⁵.



Rys. 40 Rozkład typowych mocy i możliwości magazynowania energii elektrycznej przy wykorzystaniu niektórych technologii¹⁰⁵

Reasumując, zastosowanie mikrosieci w portach lotniczych jest coraz powszechniejsze. Awaria zasilania na jednym z największych lotnisk na świecie w Atlancie w grudniu 2017 r. wywołała chaos wśród pasażerów i ogromne straty finansowe wynikające z uziemienia prawie 1600 lotów. Ta trwająca 11 godzin przerwa w zasilaniu wpłynęła na dziesiątki tysięcy pasażerów również poza Atlantą. Wymusiła zastosowanie rozwiązań chroniących lotnisko przed tego typu zdarzeniami. W efekcie do zarządzania skojarzonego systemu ogrzewania i zasilania wykorzystano mikrosieć

¹⁰⁵ Herlender K. Magazynowanie energii w systemach generacji rozproszonej. Politechnika Wroclawska, Instytut Elektroenergetyki. VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012, str. 3

pozwalającą na funkcjonowanie obiektów o znaczeniu krytycznym dla funkcjonowania lotniska w sytuacji odcięcia od zewnętrznych źródeł energii¹⁰⁶.

1.10 Wykorzystanie kogeneracji i trigeneracji w cywilnym porcie lotniczym

Jednym z czynników zwiększających efektywność wykorzystania energii w porcie lotniczym jest konwersja źródła energii na dwa lub trzy produkty energetyczne. W pierwszym przypadku mówimy o kogeneracji, a w drugim o trigeneracji. Zastosowanie tej techniki daje duże oszczędności paliwa oraz zwiększa wydajność systemów zasilania do 85%¹⁰⁷. Układy kogeneracyjne wytwarzające ciepło i energię elektryczną tzw. CHP (ang. *Combined Heat and Power*), znalazły szerokie zastosowanie w portach lotniczych. Wytwarzane w tych systemach ciepło może być wykorzystane również do systemów klimatyzacji, wtedy mamy do czynienia z trigeneracją.

Przykładem pierwszego może być układ kogeneracyjny wykorzystany w porcie lotniczym w Düsseldorfie oparty o zasilane gazem ziemnym dwa silniki wytwarzające zarówno energię elektryczną, jak i ciepło. Wytwarzane ciepło jest dostarczane do systemu grzewczego hangarów i obiektów obsługowych lotniska. Każdy z dwóch generatorów gazowych firmy MWM wytwarza 999 kW mocy elektrycznej i 1197kW cieplnej¹⁰⁸.

Przykładem trigeneracji może być rozwiązanie zastosowane w elektrociepłowni na lotnisku w Mediolanie. Zasilana gazem instalacja, składająca się z trzech silników ma zbudowany system odzysku ciepła z tych silników, służy do zasilania systemu ogrzewania i klimatyzacji lotniska. Moc instalacji to 24MW. Trigeneracja w tym przypadku polega na konwersji paliwa gazowego na trzy produkty energetyczne: elektryczność, gorącą wodę do ogrzewania i wodę lodową do chłodzenia¹⁰⁹.

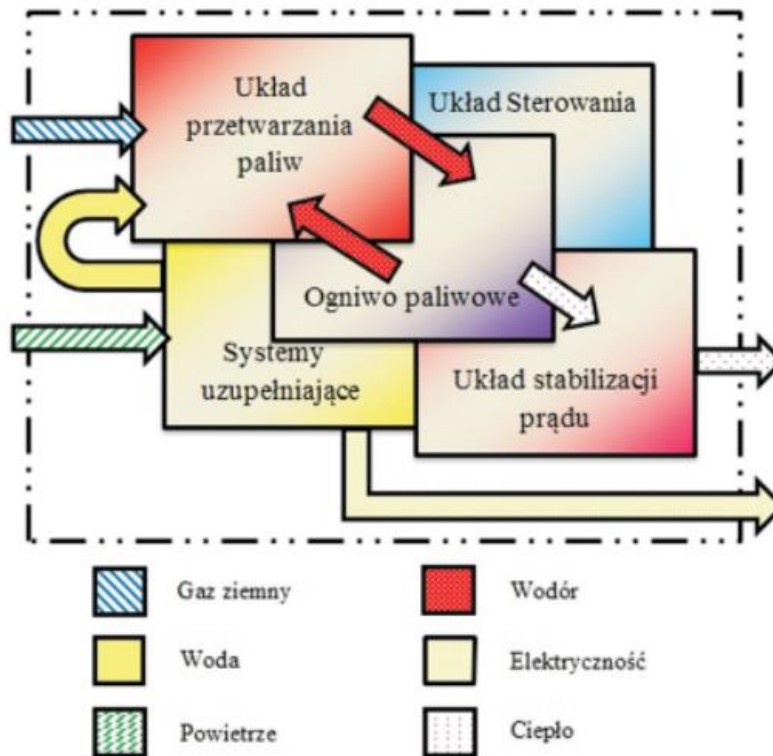
¹⁰⁶ Thornton R. Lotnisko Atlanta demonstruje zapotrzebowanie na mikrosieci do skojarzonego ogrzewania i zasilania (CHP). <https://www.districtenergy.org/blogs/robert-thornton/2017/12/19/atlanta-airport-demonstrates-need-for-combined-heat-and-power-generation/>; wejście 15.06.21

¹⁰⁷ Ionita, C.; Marinescu, M. A review of combined heat and power generation. *Sci. Bull. Ser. D Mech. Eng.* 2002, 64, p.71–80.

¹⁰⁸ <https://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-cogeneration/press/press-releases/cogeneration-at-duesseldorf-international-airport-reliable-energy-for-the-future/>; wejście 14.06.21

¹⁰⁹ <https://www.wartsila.com/media/news/23-02-2005-24-mw-cogeneration-plant-for-milan-airport>; wejście 14.06.21

Doskonałym przykładem kogeneracji jest wspomniane w rozdziale 1.8 ogniwo paliwowe, które wytwarza energię elektryczną, a produktem ubocznym jest ciepło, które poprzez podgrzanie wody może służyć do ogrzewania. Na rys. 41 w sposób poglądowy pokazano schemat wzajemnego powiązania poszczególnych układów całego systemu ogniwa paliwowego i przepływów poszczególnych strumieni gazów, prądu elektrycznego i ciepła¹¹⁰.



Rys. 41 Poglądowa Idea kogeneracji na bazie ogniwa paliwowego¹¹⁰

Zastosowanie kojarzenia energii w portach lotniczych jest bardzo powszechne, a przy zastosowaniu mikrosieci oprócz ewidentnych oszczędności daje bezpieczeństwo funkcjonowania instalacji.

¹¹⁰ Demusiak G. Otrzymywanie paliwa wodorowego metodą reformowania gazu ziemnego dla ogniwa paliwowych małej mocy. Instytut Nafty i Gazu. Oddział Warszawa, październik 2012, str. 668

2 CHARAKTERYSTYKA WOJSKOWEJ BAZY LOTNICZEJ

2.1 Cechy wojskowej infrastruktury lotniczej i systemu zarządzania energią w Polsce

Wojskowe bazy lotnicze mają odmienną strukturę organizacyjną i przeznaczenie w stosunku do cywilnych portów lotniczych. Baza lotnicza podobnie jak cywilny port lotniczy to: „wydzielony obszar na lądzie, wodzie lub innej powierzchni, w całości lub części przeznaczony do wykonywania startów, lądowań i naziemnego lub nawodnego ruchu statków powietrznych wraz ze znajdującymi się w jego granicach obiektami i urządzeniami budowlanymi o charakterze trwałym. Lotnisko musi posiadać zatwierdzoną instrukcję operacyjną oraz musi być wpisane do rejestru lotnisk i lądowisk wojskowych lub rejestru lotnisk cywilnych. Lotnisko wojskowe jest obiektem wykorzystywanym przez resort obrony narodowej do celów obronności i bezpieczeństwa państwa”¹¹¹.

Lotnisko wojskowe i jego infrastruktura cechuje się podobnymi do cywilnych portów lotniczych potrzebami energetycznymi, konieczne jest jedynie zrozumienie charakteru prowadzonych w bazach operacji lotniczych. Celem analiz porównawczych jest również znalezienie podobieństw w zakresie podejścia do zagadnienia poprawy efektywności energetycznej. Typowe lotnisko wojskowe obejmuje następujące elementy infrastruktury:

- drogi startowe i kołowania;
- płaszczyzny postoju samolotów;
- strefy rozśrodkowania samolotów ze schrono-hangarami lub bez;
- hangary do prowadzenia obsługi technicznych;
- wieże kontroli lotów;
- strażnice ppoż;
- obiekty i instalacje do przechowywania i dystrybucji paliw i gazów technicznych;

¹¹¹ 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 r.

- urządzenia kontroli ruchu lotniczego w przestrzeni nad lotniskiem i po drogach kołowania na terenie lotniska;
- systemy kierowania, dowodzenia i łączności;
- stacje meteorologiczne;
- obiekty magazynowe różnego typu;
- obiekty szkoleniowe (hale sportowe, strzelnice, trenażery, symulatory itd.)
- budynki administracyjno-sztabowe.

Wszystkie z wymienionych elementów lotniska znajdzie swoje odpowiedniki na lotnisku cywilnym. Lotnicze bazy wojskowe różnią się w pewnym zakresie od lotnisk cywilnych, jak również między sobą, pewnymi elementami infrastruktury, na co wpływ ma przeznaczenie danej jednostki lotniczej oraz liczba i typ operujących tam statków powietrznych. Struktura organizacyjna baz jest zbliżona i obejmuje Dowództwo i Sztab, Grupę Działań Lotniczych, Grupę Obsługi Technicznej, Grupę Wsparcia oraz Wojskowy Port Lotniczy. Każdy z tych elementów wykorzystuje do realizacji zadań dedykowane obiekty i urządzenia, które znajdują się również na lotniskach cywilnych, choć będą one podporządkowane innym pionom funkcjonalnym.

Bazy lotnicze różnią się wielkością, typami statków powietrznych i nowoczesnością rozwiązań zastosowanych w budowie infrastruktury. 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. Biorąc pod uwagę przyjęty cel badań nie jest istotny typ statku powietrznego, ani operacyjno-taktyczne przeznaczenie bazy w systemie obronnym Sił Zbrojnych RP.

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).

Wojskowe kompleksy lotniskowe są to przeważnie obiekty wybudowane wiele lat temu, intensywnie rozbudowywane i modernizowane w ostatnich kilkunastu latach. Pomiar zapotrzebowania na energię odbywa się w sposób scentralizowany w oparciu o liczniki zainstalowane w głównej trafostacji, czasami odczyt odbywa się z kilku stacji transformatorowych. W wielu przypadkach mamy do czynienia ze współużytkowaniem części linii przesyłowych i stacji trafo przez MON i dostawcę zewnętrznego. Powoduje to często problem z kompensacją energii biernej, ze względu na brak technicznych możliwości wyodrębnienia właściciela źródeł generowania tej mocy.

System zarządzania obszarem energetycznym w siłach zbrojnych jest bardzo scentralizowany. W strukturze resortu obrony narodowej komórka właściwą w sprawach regulacji gospodarki paliwami i energią jest Wojskowa Inspekcja Gospodarki Energetycznej (WIGE) ulokowana w Warszawie. Inspekcja odpowiada między innymi za:

- prowadzenie gospodarki energetycznej - zgodnie z obowiązującymi przepisami krajowymi;

- zwiększenie poziomu bezpieczeństwa energetycznych kompleksów;
- poprawę poziomu bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń, instalacji i sieci;
- racjonalizację kosztów użytkowania kompleksów i systemów energetycznych;
- poprawę efektywności energetycznej obiektów;
- udzielanie koncesji i zatwierdzanie taryf na wytwarzanie, przesyłanie i dystrybucję energii cieplnej;
- weryfikowanie opracowań technicznych w zakresie wypracowania optymalnych rozwiązań modernizacyjnych;
- identyfikowanie nowoczesnych rozwiązań technicznych w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa energetycznych kompleksów;
- weryfikowanie opłacalności stosowania nowoczesnych technologii, w tym odnawialnych źródeł energii (OZE). WIGE odpowiada również za szkolenie i doradztwo w zakresie:
 - racjonalnego gospodarowania paliwami i energią;
 - dostępnych środków poprawy efektywności energetycznej;
 - optymalizacji opłat za paliwa i energię;
 - optymalizacji rozwiązań technicznych w dziedzinie energetyki.

Zadania te WIGE realizuje poprzez trzy Delegatury ulokowane w Bydgoszczy, Krakowie i Wrocławiu. Ogółem etatowo cała struktura obejmuje ponad trzydzieści stanowisk i obejmuje wszystkie kompleksy woskowe, nie tylko bazy lotnicze. WIGE udziela również wsparcia jednostkom organizacyjnym resortu obrony narodowej w sprawach spornych rozstrzyganych przez Urząd Regulacji Energetycznej (URE) oraz koordynuje działalność sześciu Wojskowych Energetycznych Komisji Kwalifikacyjnych spełniając wymogi art. 54 ust. 1 ustawy - Prawo Energetyczne za resort.

Struktura ta nadzoruje funkcjonowanie niemal 900 kotłowni różnego typu, z czego najwięcej bo 279 na olej, 272 na gaz, 225 na paliwo stałe, a pozostałe zasilane są prądem. Kontroluje 1319 przyłączy elektroenergetycznych oraz 767 węzłów cieplnych oraz 696 km sieci cieplnych w jednostkach na terenie całego kraju.

Przeprowadzane kontrole i nadzory koncentrują swój wysiłek na bezpieczeństwie eksploatacji i racjonalizacji kosztów zakupu energii (paliw)

i podniesieniu efektywności eksploatacji. Średnio w roku analizie poddawanych jest 230-250 przyłączy. Zgodnie z wytycznymi WIGE zarządcy nieruchomości (Zarządy Infrastruktury podległe pod Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych) analizują zużycie energii w kompleksach wojskowych i w ramach przetargów oraz negocjacji z dostawcami energii ustalają, plany taryfowe i zapotrzebowanie na moc. W ramach dostępnych możliwości technicznych prowadzone są analizy w zakresie generowanej energii biernej, celem redukcji opłat w tym zakresie. Co roku analizie procesu spalania w kotłach na paliwa płynne i gazowe poddawanych jest około 60 kotłów i wydawane są stosowne polecenia w zakresie ich regulacji. Dla przykładu w latach 2015-2017 wykonano 180 analiz i zdefiniowano potrzebę regulacji 57 kotłów. W tym samym okresie 196 urządzeń i instalacji zostało wyłączonych z eksploatacji. Zaopiniowano 979 opracowań technicznych na obiekty budowlane, instalacje i urządzenia, czego efektem było zgłoszenie 526 uwag, co przyniosło 27 mln. zł. oszczędności w zakresie efektywności energetycznej.

Mimo podejmowanych działań trudno będzie w obecnej strukturze organizacyjnej wprowadzić zasadnicze zmiany i uzyskać wyraźne efekty w zakresie redukcji energochłonności w infrastrukturze SZRP. Struktura organizacyjna zajmująca się problematyką efektywności energetycznej nie jest wystarczająca do zabezpieczenia efektywnego zarządzania energią.

Bez zbudowania zespołów specjalistów i świadomości na poziomie bezpośredniego użytkownika obiektu, czy też kompleksu infrastruktury nie będzie możliwe trwałe odwrócenie tendencji. Podstawowym problemem jest wykonywanie tych funkcji na poziomie administratora obiektu, często przez nieetatowego, słabo opłacanego pracownika. Należy stwierdzić, że w zasobie resortu praktycznie brak ekspertów z obszaru energetyki, a szkolnictwo wojskowe nie kształci w tym kierunku. Mało tego obiektem, instalacją, czy kompleksem administruje często nie ten, kto jest użytkownikiem. Stosunkowo najlepiej sytuacja wygląda w bazach sił powietrznych, bowiem większość z nich jest administratorem na swoim kompleksie. 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.

Ogromne potrzeby inwestycyjne sił zbrojnych, znacznie przekraczające możliwości budżetowe resortu powodują koncentrację wysiłku na minimalizacji kosztów związanych z modernizacją istniejących, czy też budową nowych obiektów. To ogranicza inwestycje w najlepsze rozwiązania technologiczne dostępne na rynku związane z poprawą efektywności energetycznej, koncentrując się na zabezpieczeniu podstawowej potrzeby jednostki wojskowej wynikającej z jej przeznaczenia.

2.2 Możliwości zastosowania rozwiązań wykorzystywanych w cywilnych portach lotniczych dla wojskowych baz lotniczych

Analiza przedstawionych w rozdziale pierwszym metod poprawy efektywności energetycznej cywilnych portów lotniczych wskazuje, że mimo istotnych różnic między infrastrukturą cywilną a wojskową, istnieje możliwość wykorzystania większości z omawianych rozwiązań technologicznych w obu przypadkach.

Polska strategia wojskowa do tej pory skupiała się bardziej na zapewnieniu zdolności operacyjnych. Kwestie efektywności energetycznej i ochrony środowiska nie były głównymi determinantami podejmowanych decyzji.

W państwach sojuszu północnoatlantyckiego podejście jest zróżnicowane. W wielu z nich staje się to kwestią o znaczeniu krytycznym dla zapewnienia ciągłości realizowanych zadań przez lotnictwo. Wymiar środowiskowy znalazł swoje odzwierciedlenie jako element szeroko rozumianego bezpieczeństwa w strategii Sojuszu¹¹².

W strategii tej stwierdza się między innymi, że hybrydowe generowanie mocy wraz z inteligentną dystrybucją poprzez mikrosieci, które mogą funkcjonować autonomicznie lub we współdziałaniu z zewnętrzną siecią dystrybucyjną, zapewniają autonomię w zakresie dystrybucji energii i odporność baz i instalacji wojskowych. Rozwinięcie mobilnych generatorów energii z wykorzystaniem źródeł odnawialnych oraz zdolnością do magazynowania energii, oprócz zapewnienia zdolności

¹¹² The contribution of sustainable energy sources to the resilience of military energy supply and operational effectiveness, Political Committee, AC/119-N(2021)0011, 1 April 2021

operacyjnych, daje unikalną możliwość prowadzenia akcji pomocy humanitarnej w rejonach klęsk żywiołowych, gdzie sieci dystrybucyjne są całkowicie zniszczone.

Zwraca się również uwagę na inne zalety odnawialnych źródeł energii dla prowadzenia skrytych działań. Klasyczne generatory prądu emitują hałas i ciepło, a więc są łatwe do wykrycia przy użyciu szerokiej gamy sensorów wykorzystywanych przez wojsko. Panele fotowoltaiczne mogą być elastyczne, podatne do przenoszenia, wybarwione w sposób, który je kamufluje oraz zaadaptowane do różnego rodzaju podłoży. Podobne cechy posiadają ogniwa wodorowe. Nie generują one sygnatury cieplnej oraz pracują bezgłośnie. Podkreśla się ogromne znaczenie zastosowania sztucznej inteligencji w zarządzaniu dystrybucją energii, zapewniając zasilanie najbardziej krytycznych elementów w sytuacjach deficytu, awarii, czy ataku, przy wykorzystaniu zaawansowanych algorytmów optymalizacyjnych przekierowujących energię z różnych źródeł i wyłączających mniej krytyczne dla wykonywanych zadań odbiorniki. Ogromnego znaczenia nabiera również ochrona środowiska, która wiąże się bezpośrednio z bezpieczeństwem środowiska działań militarnych. Wpływ środowiska na instalacje wojskowe i same wojska jest taki sam jak na całe społeczeństwo i infrastrukturę cywilną. Jeśli poziom morza się podniesie to zalane zostaną również instalacje sił morskich, wzrost poziomu opadów to powódzie (dotkną instalacje wojskowe, ale będą wymagały użycia znacznych sił militarnych w ramach udzielanej akcji ratowniczej). Susza to pożary i brak wody, co wpływa na działania wojsk, a wysoka temperatura zwiększa zapotrzebowanie na energię i zmniejsza parametry lotne samolotów, a zwłaszcza śmigłowców.

Krajem wiodącym w problematyce optymalizacji energii infrastruktury wojskowej są Stany Zjednoczone, Wielka Brytania, Niemcy oraz Kanada. Działania podejmowane w USA i wskazanych państwach Sojuszu, spowodowały wzrost zainteresowania energią w ramach inicjatyw NATO. Zainteresowanie tematyką energetyki rozpoczęto poważną debatą w 2006 roku podczas szczytu w Rydze. Jedną z konsekwencji wynikającej z Deklaracji Ryskiej było utworzenie w 2012 roku na Litwie Centrum Doskonalenia NATO ds. Bezpieczeństwa Energetycznego.

W konsekwencji podjęto działania mające na celu poprawę efektywności energetycznej w siłach zbrojnych Sojuszu Północnoatlantyckiego poprzez zastosowanie

szerokiego wachlarza dostępnych środków takich jak: zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii oraz lepszego zarządzania energią. Pod auspicjami wyżej wspomnianego centrum co roku odbywają się konferencje i wystawy zatytułowane „Innowacyjne rozwiązania energetyczne w zastosowaniach wojskowych”

Podobne działania podjęto w UE. W 2013 roku ministrowie obrony Unii Europejskiej utworzyli projekt *Go Green*, który został zaimplementowany przez siedem państw w ramach Europejskiej Agencji Obrony (Austria, Cypr, Czechy, Niemcy, Grecja, Luksemburg i Rumunia). Projekt ten to model biznesowy tnący koszty poprzez zastosowanie odnawialnych źródeł energii.¹¹³

W naszym przypadku potencjalne przerwy w dostawie energii elektrycznej do lotniczych baz wojskowych w skrajnym przypadku mogą 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.

W 2008 r. w jednej z instalacji w bazie Peterson Sił Powietrznych USA doszło do awarii systemu zasilania, który w konsekwencji przerwał funkcjonowanie centrum operacyjnego Dowództwa Obrony Przestrzeni Powietrznej Ameryki Północnej (*North American Aerospace Defense Command – NORAD*). Raport Zarządzania Energią dla Kongresu USA za rok fiskalny 2013 informuje, że Departament Obrony raportował

¹¹³ 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, str. 10

w tym okresie 180 przerw w dostawach energii do instalacji wojskowych trwających powyżej ośmiu godzin, co powodowało straty rzędu 220 tys. USD za dzień¹¹⁴.

Dlatego w wielu krajach, niezależnie od NATO, od lat prowadzi się działania mające na celu minimalizację lub całkowite uniezależnienie od źródeł zewnętrznych. Do tego celu prowadzone są prace nad optymalizacją zużycia oraz zastosowaniem alternatywnych, w głównej mierze właśnie odnawialnych źródeł energii. Dodatkowym efektem tego typu działań jest redukcja wydatków obronnych lub przesunięcie środków budżetowych z kosztów związanych z utrzymaniem obiektów na modernizację techniczną.

Na przykład Siły Powietrzne USA wdrażają od 2008 r. strategię energetyczną dla własnej infrastruktury¹¹⁵. Cele takiego podejścia zakładały coroczną redukcję zapotrzebowania na energię o 3% i wdrażanie źródeł odnawialnych, uzyskując trzydziestoprocentową redukcję zużycia do roku 2030. Realizację tych celów oparto o cztery filary:

- poprawa istniejącej infrastruktury;
- budowanie nowej z wykorzystaniem rozwiązań ukierunkowanych na efektywność energetyczną;
- szerokie zastosowanie odnawialnych źródeł energii (substytucja infrastruktury zasilającej na poziomie 25% do 2025 r.);
- zarządzanie kosztami;

W strategii wyraźnie wskazano, że zarządzanie energią w bazie lotniczej nie może być realizowane przez jednego, czy dwóch specjalistów, którzy podobnie jak w Polsce ulokowani są w pododdziale zabezpieczenia. Musi do tego celu zostać stworzony zespół wielobranżowych inżynierów i techników do sterowania urządzeniami oraz systemami kontroli. W USA na poziomie baz lotniczych utworzono Grupy Sterowania Zarządzaniem Energetycznym (*Energy Management Steering Groups* – EMGs). Na wyższych szczeblach dowodzenia, w tym dowództwie Sił Powietrznych utworzono podobne zespoły. Na poziomie dowództwa Sił Powietrznych,

¹¹⁴ David Schill, Improving Energy Security for Air Force Installations, https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/rgs_dissertations/RGSD300/RGSD361/RAND_RGSD361.pdf

¹¹⁵ United States Air Force 2008 Infrastructure Energy Strategic Plan, Office of the Air Force Civil Engineer

w grupie tej są zaangażowani przedstawiciele wszystkich departamentów, w tym asystent sekretarza stanu do spraw sił powietrznych odpowiedzialny za infrastrukturę. Takie rozwiązania zapewniają zarządzanie energią na poziomie instalacji oraz wsparcie procesów decyzyjnych w tym obszarze, a także promocję rozwiązań na szczeblach nadrzędnych.

Podobnie jak w przypadku cywilnych portów lotniczych zastosowanie rozwiązań komercyjnych w instalacjach wojskowych obarczone jest pewnymi warunkami:

- jeśli bazy lotnicze miałyby być samowystarczalne, niezbędne jest zbudowanie mikrosieci, pozwalającej na kontrolę zużycia i zapotrzebowania na energię, w tym na sterowanie alternatywnymi źródłami jej wytwarzania;
- ze względu na brak ciągłości produkcji energii ze źródeł odnawialnych niezbędne jest zbudowanie kombinacji tych rozwiązań;
- przyjęte rozwiązania i inwestycje muszą mieć akceptowalny koszt i przynieść wymierne korzyści operacyjne dla bazy wojskowej w kontekście znacznie obniżonego lub wyeliminowanego ryzyka utraty zdolności do realizacji zadań lotniczych (samowystarczalność w zakresie realizacji krytycznych funkcji).

W 2017 r. Siły Powietrzne USA przedstawiły nowy, zmodyfikowany plan zatytułowany *Energy Flight Plan 2017-2036*¹¹⁶, w którym zdefiniowano następujące strategiczne cele energetyczne:

- poprawić odporność energetyczną;
- zoptymalizować zapotrzebowanie na energię;
- zapewnić ciągłość zasilania.

Każdemu z celów strategicznych przypisano zespół działań prowadzących do uzyskania oczekiwanych efektów.

Poprawa odporności energetycznej polega na:

- identyfikacji luk bezpieczeństwa źródeł zasilania, takich jak ataki fizyczne, cyberataki i katastrofy naturalne;
- łagodzeniu wpływu przerw w zasilaniu na krytyczne środki, obiekty i zadania;

¹¹⁶ 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>

- rozbudowie zdolności do priorytetyzacji źródeł względem ryzyka realizowanych misji;
- rozbudowie bezpieczeństwa fizycznego i cybernetycznego w celu ochrony systemu energetycznego.

W zakresie optymalizacji zapotrzebowania na energię USAF dążą do:

- poprawy efektywności energetycznej i operacyjnej systemów Sił Powietrznych;
- poprawy zdolności poprzez skupienie wysiłku na energii niezbędnej do realizacji zadań;
- wdrożenia zagadnień energetycznych do procesów badawczo-rozwojowych, testów i ocen.

Zapewnienie ciągłości zasilania w instalacjach Sił Powietrznych USA zakłada:

- integrację alternatywnych źródeł energii kompatybilnych z wymaganiami wynikającymi z realizowanych zadań;
- dywersyfikację źródeł zasilania;
- zwiększenie dostępu do niezawodnych i nieprzerwanych źródeł energii.

Aby osiągnąć założone cele Siły Powietrzne USA zbudowały odpowiednie ramy zarządzania projektem, bardzo zbliżone do modelu zarządzania ISO 50001, opisanego w rozdziale 1.2.2. Bardzo silnie zaakcentowano potrzebę finansowania przedsięwzięcia w sposób nadający wizji realny kształt, zapewnienia właściwie przygotowanych do zadania kadr oraz ewoluującej wiedzy na temat istniejących i pojawiających się nowych zjawisk, wpływających na siły powietrzne.

Efektem powyższych działań jest szerokie zastosowanie odnawialnych źródeł energii w bazach lotniczych. Dla przykładu w 2007 r. w Bazie Sił Powietrznych USA w Las Vegas (Nevada) wybudowano pierwszą instalację fotowoltaiczną o mocy 13,2 MW. Kolejny system o mocy 15MW wybudowano w roku 2015. W słoneczne dni cały system jest w stanie zaspokoić potrzeby energetyczne całej instalacji wojskowej, w której pracuje 12 tys. ludzi. Układ fotowoltaiczny składa się z 43,2 tys. paneli¹¹⁷.

¹¹⁷ 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>

Szacuje się, że roczne oszczędności wynikające ze zmniejszonego poboru energii z sieci zewnętrznej wynoszą 1 milion USD¹¹⁸. Zdjęcie tej instalacji pokazuje rys. 42.



Rys. 42 Instalacja fotowoltaiczna Nellis AFB USA¹¹⁸

Reasumując, 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.

¹¹⁸ <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>

3 MODEL BUDOWY PROFILU ENERGETYCZEGO W PORTACH LOTNICZYCH

3.1 Identyfikacja profilu energetycznego

Rozpoznanie profilu energetycznego lotniska jest kluczem do zaprojektowania systemu zasilania, odpowiedniego dla przyjętej strategii poprawy efektywności energetycznej. Jest to najważniejszy element w systemie zarządzania, realizowany na etapie planowania.

Punktem wyjścia do analizy i modelowania procesów zużycia energii, zgodnie z opisem zamieszczonym w rozdziale 1.2.2 wspomnianego wcześniej *Energy Flight Plan 2017-2036* jest zgromadzenie niezbędnych danych administracyjnych, statystycznych i meteorologicznych. Jak wspomniano 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 można podzielić na¹¹⁹:

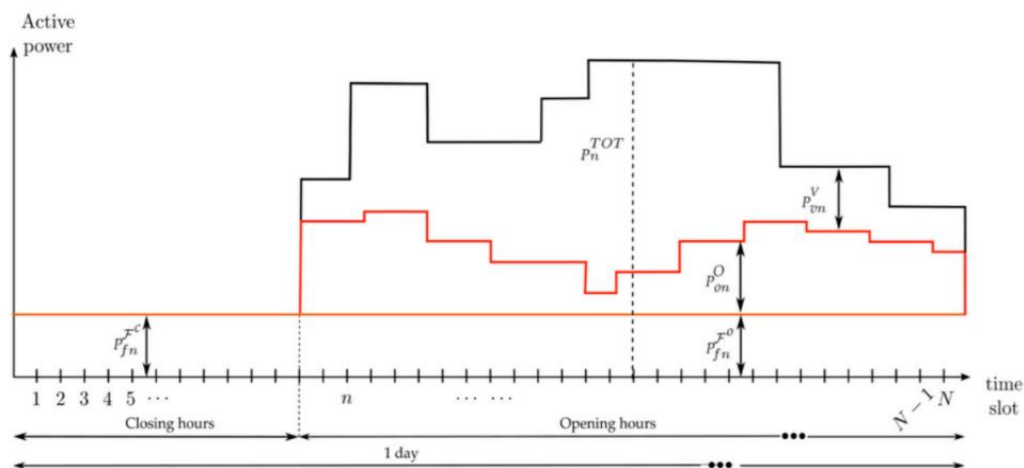
- stale zasilane (zasilane w sposób ciągły, generujące minimalne zapotrzebowanie na energię niezbędną do funkcjonowania krytycznych elementów lotniska takich jak urządzenia radionawigacyjne, systemy kontroli lotów, systemy bezpieczeństwa, czy centra przetwarzania danych);
- zasilane standardowo w czasie pracy lotniska (urządzenia zapewniające gotowość do obsługi pasażerów i samolotów np. systemy ogrzewania,

¹¹⁹ 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

wentylacji, klimatyzacji, systemy informacyjne, sygnalizacyjne, czy oświetlenie);

- zasilane dynamiczne w zależności od potrzeb (zależne od liczby pasażerów i obsługiwanych lotów – np. bramki kontroli bezpieczeństwa, rękawy, poczekalnie, taśmociągi do transportu bagaży).

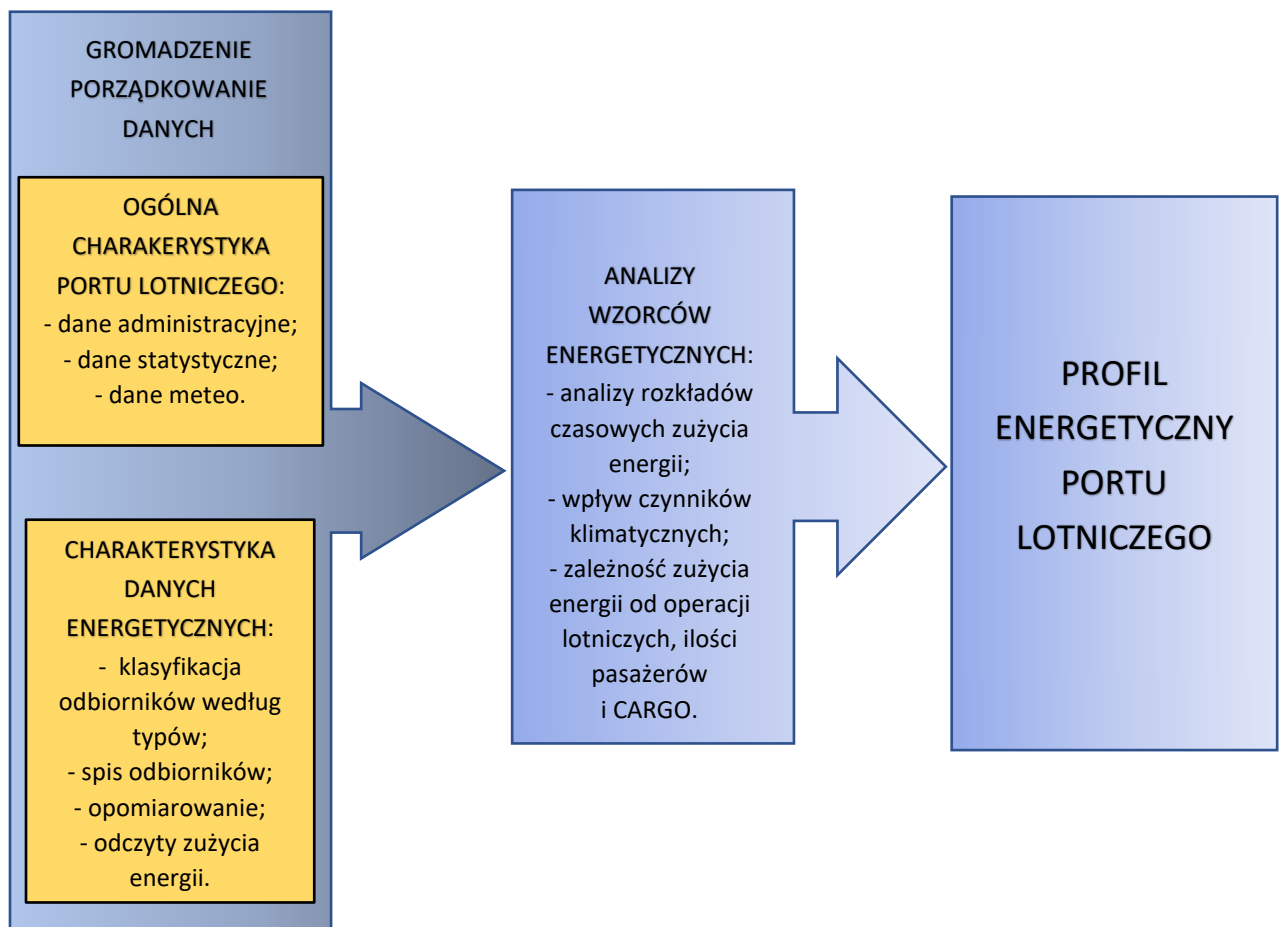
Analiza zużycia energii w poszczególnych grupach odbiorników pozwala na zbudowanie modelu zużycia energii w funkcji czasu dla wskazanej infrastruktury. Dane te pozwalają na identyfikację procesu zmian zapotrzebowania na energię w porcie lotniczym w układzie dobowym. Można również rozwinąć ten model do 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. Może ona obejmować sposób wykorzystania, sposób regulacji czasu pracy, czy awaryjność systemów. Na przykład budując taki model dla hiszpańskiego portu lotniczego Santander, odczyty były realizowane w równych przedziałach czasowych, zazwyczaj wynoszących 15 minut, co pozwoliło na stworzenie założeń modelu energetycznego przedstawionego na rys. 43.



Rys. 43 Model odbioru energii w porcie Santander¹¹⁹

Na rysunku powyżej, czarna górna część wykresu charakteryzuje całkowitą moc pobieraną przez port lotniczy, linia czerwona to charakterystyka zmian dynamicznego poboru mocy przez urządzenia włączane w godzinach pracy portu lotniczego. Linią

porównawczą zaznaczono pobór mocy urządzeń stale zabezpieczających funkcjonowanie instalacji.



Rys. 44 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.)

W innym przypadku celem zwiększenia precyzji wyników do zbudowania profilu zużycia energii w trzech indyjskich portach lotniczych posłużono się podobnymi danymi, ale rejestrowanymi z częstotliwością dwóch minut na dobę¹²⁰.

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

¹²⁰ Kanika Malik. (2017). Assessment of energy consumption pattern and energy conservation potential at Indian airports. Journal of Construction in Developing Countries, 22(Supp. 1): 97–119. <https://doi.org/10.21315/jcdc2017.22. supp1.6;>

wszystkich instalacji odbiorczych oraz dane operacyjne (liczba pasażerów, lotów, masa obsługiwanych 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.

Na rysunku 44 zilustrowano przykładową metodykę identyfikacji modelu energetycznego dla portu lotniczego. Analizy energetyczne wskazują, że najwyższe współczynniki korelacji zużycia energii elektrycznej występują dla czynników klimatycznych¹²¹. 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 analizy 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.

3.2 Prognozowanie zużycia energii

Wybór metody prognozowania zużycia energii lub zapotrzebowania na moc, uzależniony jest od wyników jakie chcemy osiągnąć w procesie optymalizacji zużycia energii infrastruktury lotniskowej. Do przygotowania zmian związanych z wymianą, adaptacją, modernizacją istniejących lub zastosowaniem nowych rozwiązań energetycznych, czyli dużymi inwestycjami obliczonymi na lata, stosuje się predykcję długoterminową. Jeżeli chcemy prognozować dynamikę zmian zapotrzebowania na energię w celu sterowania systemami zasilania w układzie np. dobowym będziemy potrzebowali prognozowania krótkoterminowego, wymagającego bardziej

¹²¹ Piotr Helt, Mirosław Parol, Paweł Piotrowski Metody sztucznej inteligencji. Przykłady zastosowań w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012: str. 91

szczegółowych danych z próbkowaniem w zakresie minut i godzin. W przypadku potrzeb związanych z planowaniem eksploatacji systemów, w tym obsługa i napraw, dane powinny być prognozowane w cyklu dziennym i miesięcznym.

Jak wspomniano w rozdziale 1.2.2, prognozowanie zużycia energii można podzielić na metody statystyczne, sztucznej inteligencji i mieszane (inaczej hybrydowe). W literaturze można znaleźć również inne, bardziej rozbudowane podziały obejmujące na przykład podejście do modelowania oparte na kalkulacjach (obliczeniowe) oraz oparte na pomiarach (pomiarowe)¹²².

Modelowanie kalkulacyjne obejmuje:

- metody inżynierskie (oparte na zbudowanych szczegółowych modelach oprogramowania, odzwierciedlających fizyczne zachowanie energii w systemie przy znanych parametrach wejściowych, a ukierunkowane na uzyskanie prognozy dla danych wyjściowych, wymagające szczegółowych specjalistycznych danych strukturalnych i termicznych dotyczących obiektów budowlanych oraz zaawansowanej wiedzy eksperckiej do budowy modelu – biała skrzynka);
- metody statystyczne (inaczej modelowanie odwrócone, oparte na zgromadzonych danych liczbowych - czarna skrzynka);
- metody sztucznej inteligencji (oparte o sieci neuronowe, maszyny wektorowe, drzewa decyzyjne, czy algorytmy genetyczne);
- metody hybrydowe (stanowiące połączenie wybranych elementów wspomnianych metod – szara skrzynka).

Natomiast modelowanie oparte na pomiarach obejmuje:

- metody wykorzystujące dokumenty rozliczeń za energię (najprostszy sposób, łatwo dostępny, obarczony jednak wadą jaką jest odczyt z częstotliwością miesięczną i agregacją danych u użytkownika końcowego, co nie daje pełnej możliwości oceny efektywności energetycznej oraz budowy profilu energetycznego);

¹²² Wang, S.; Yan, C.; Xiao, F. Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. *Energy Build.* 2012, 55, 873–888.

- metody wykorzystujące dane z opomiarowania systemów energetycznych (ten sposób optymalizacji poboru energii pozwala na lepszą kontrolę zapotrzebowania na energię, ocenę ilościową zużycia, identyfikację odbiorników, rejestrację pracy urządzeń w tym ich awaryjności, ocenę funkcjonowania poszczególnych podsystemów);

Oceniając tą klasyfikację, należy stwierdzić, że do oceny efektywności energetycznej portu lotniczego można wykorzystać każdą z wymienionych metod, ale jej dobór uzależniony jest od kilku czynników:

- stopnia nowoczesności infrastruktury portu lotniczego, w tym zaawansowania systemów sterowania i opomiarowania – jakość danych;
- kwalifikacji personelu;
- oczekiwanych efektów;
- dostępnych środków finansowych na poprawę efektywności energetycznej;
- dostępu do narzędzi wspierających proces modelowania zużycia energii.

Biorąc pod uwagę największą złożoność metody inżynierskiej, rozbudowano pozostałe warianty, tworząc zestaw metod uproszczonych.

W przypadku zastosowania metod statystycznych największe znaczenie dla zbudowania modelu energetycznego ma jakość i ilość danych historycznych dotyczących zużycia energii i zmiennych mających potencjalny wpływ na jej wielkość. Zazwyczaj te metody wykorzystują mniej zmiennych i nie wymagają pełnego zrozumienia fizyki zachodzących w systemie procesów¹²³.

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 danych wejściowych, są uznawane za najpowszechniejsze narzędzie do prognozowania

¹²³Khosravani, 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>

zużycia energii w obiektach budowlanych¹²⁴. Analiza porównawcza metod prognozowania opartych o sieci neuronowe z metodami kalkulacji poziomu zużycia energii elektrycznej oraz mocy szczytowej stosowanych przy zawieraniu umów przez zakłady energetyczne z dużymi odbiorcami energii elektrycznej wykazała, że technika sieci neuronowych daje około 2-3-krotnie lepsze rezultaty niż prosta metoda statystyczna. Istotną zaletą sieci neuronowych jest ich zdolność do generalizowania¹²⁵.

W przypadku dostępu do ograniczonej ilości danych i tylko częściowej wiedzy o modelowanym procesie, szersze zastosowanie mają metody hybrydowe.

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)¹²⁶. W modelu tym wykorzystano neuronową architekturę jednokierunkowej sieci wielowarstwowej. Rozwiązanie to będzie opisane w dalszej części pracy jako perceptron wielowarstwowy z regułami uczenia nadzorowanego. Algorytm uczenia nadzorowanego jest prostszy od samouczącego i częściej stosowany w praktyce.

Dla sieci neuronowej typu perceptron wielowarstwowy można zastosować różne algorytmy uczenia¹²⁷ takie jak:

- metoda delta;
- metoda propagacji wstecznej błędu;
- metoda szybkiej propagacji;
- metoda Levenberga-Marquardta;
- metoda gradientów sprzężonych.

¹²⁴ Almalag 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.

¹²⁵ Piotr Helt, Mirosław Parol, Paweł Piotrowski Metody sztucznej inteligencji. Przykłady zastosowań w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012: str. 89

¹²⁶ Piotr Helt, Mirosław Parol, Paweł Piotrowski Metody sztucznej inteligencji. Przykłady zastosowań w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012: str. 21

¹²⁷ Tamże str.26

Aby zastosować ten model prognozowania zużycia energii w porcie lotniczym, trzeba zbudować zbiór danych uczących. Jakość symulacji będzie zależała od tego, czy istnieje zależność między przyjętymi danymi wejściowymi, a faktycznym zużyciem energii. Uzyskanie pewności, co do korelacji uzyskuje się na etapie analizy wzorców energetycznych w procesie identyfikacji profilu energetycznego obiektu infrastruktury (w naszym przypadku lotniczej). Zależność ta musi mieć charakter regularny i powtarzalny. Sieć neuronowa posiada zdolność do minimalizacji błędów, braków lub luk występujących w danych wykorzystywanych w procesie analizy. Poprzez zdolność do generalizacji (określenia trendu), sieć potrafi odrzucić dane odbiegające od normy i tworzące tzw. szum. Niemniej jednak niska jakość danych może prowadzić do obniżenia precyzji generowanych przez sieć neuronową prognoz. Na etapie przygotowania danych należy wyeliminować przypadkowe wielkości, które w sposób oczywisty odbiegają od typowej wartości występującej w zbiorze danych. Ich wykrycie i usunięcie ze zbioru zapobiegnie pojawieniu się zakłóceń w procesie uczenia. Niełatwe jest zidentyfikowanie wszystkich czynników mających wpływ na proces predykcji zużycia energii, ale kluczem jest identyfikacja najważniejszych. Wprowadzenie zbyt dużej liczby zmiennych powoduje ogromny wzrost liczby operacji w procesie uczenia sieci neuronowej i komplikuje jej budowę. Wymaga to bardzo dużego zbioru danych wejściowych. Dla odmiany zbyt mała ilość zgromadzonych danych w zbiorze uczącym, prowadzi do powstania niedouczenia sieci. W praktyce jakość danych dostarczanych do algorytmu analizy opartego na sieci neuronowej zależy od konstrukcji i zaawansowania systemów pomiarowych portu lotniczego skąd dane te są pozyskiwane.

Istotną cechą sieci neuronowych jest przetwarzanie wyłącznie danych numerycznych. Jeśli w analizie profilu energetycznego lotniska zostaną zdefiniowane inne czynniki istotne w procesie symulacji (np. dni robocze, weekendy, pory roku) to w macierzy przygotowywanych danych należy również przypisać im cechy numeryczne (np. 1 to dzień roboczy, a 0 to weekend).

Decyzja o przyjęciu właściwej struktury sieci neuronowej (liczby warstw i liczby neuronów w warstwie), a także algorytmu uczenia, jest efektem procesu symulacji i porównywania uzyskiwanych wyników. Przyjąć należy, że dla n neuronów w warstwie wejściowej, wystarczająca liczba neuronów w warstwie ukrytej wynosi

$2n+1$ ¹²⁸. Należy dążyć do minimalizacji błędu predykcji, porównując dane wyjściowe z sieci w trakcie uczenia z danymi historycznymi zużycia energii, korygując strukturę lub algorytm uczenia. Do porównania używa się parametrów określających błąd sieci, jakim obarczone są wyniki symulacji przy określonej konfiguracji. Badacz decyduje o tym, jaką funkcją błędu będzie się posługiwał. W przypadku wykorzystywania do symulacji dostępnych na rynku programów komputerowych funkcja ta jest zdefiniowana w bibliotece wykorzystywanej przez dane oprogramowanie. Generalnie może to być średni błąd bezwzględny (MAE)¹²⁹ lub błąd średniokwadratowy (RMSE)¹³⁰.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - p_i| \quad (3.2.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2} \quad (3.2.2)$$

gdzie:

y_i - parametr rzeczywisty sygnału wyjściowego;

p_i - parametr sygnału wyjściowego predykcji.

Obie funkcje wyrażają średni błąd prognozowania modelu w jednostkach interesującej nas zmiennej (zużycia energii elektrycznej). Im niższa wartość błędu, tym uzyskiwane wyniki predykcji lepsze, jednak *RMSE* ze względu na metodę liczenia penalizuje duże błędy, co w niektórych przypadkach jest zaletą. Łatwiejszy w interpretacji jest *MAE*. Charakteryzuje on poprawność odwzorowania prognozowanego kształtu - charakterystyki zużycia. Oba błędy można przedstawić również w formie procentowej.

Dodatkowo stopień relacji przyjętych czynników zewnętrznych na zużycie energii w przyjętym do predykcji modelu sieci neuronowej, można weryfikować współczynnikiem regresji oznaczanym R^2 . Im wartość korelacji bardziej zbliżona do jedności tym dobór parametrów bardziej trafny.

Płaszczyzna charakterystyki błędu ma kształt zależny do tego, czy model sieci neuronowej jest liniowy, czy też nieliniowy. W pierwszym przypadku powierzchnia ta

¹²⁸ Ossowski S. Sieci neuronowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.

¹²⁹ ang. Mean Absolute Error

¹³⁰ ang. Root Mean Squared Error

ma kształt gładkiego kielicha z minimum, które wypada w najniższym punkcie. W tym przypadku mamy do czynienia z wyraźnym minimum. Dla modelu nieliniowego kształt ten jest bardziej złożony. Mogą występować różnego rodzaju zagłębienia powierzchni, tworząc lokalne minima błędu, a znalezienie błędu globalnego nie jest łatwe i wymaga bardziej zaawansowanych algorytmów.

W metodzie propagacji wstecznej błędu wyliczany jest wektor gradientu powierzchni błędu, inaczej kierunek na tej powierzchni, gdzie błąd rośnie najszybciej. Algorytm uczenia koryguje kierunek zmian wag sieci w kierunku przeciwnym do wyliczonego gradientu i wykonuje kolejne kroki w celu zmniejszenia błędu.

Gęstość, czy też próbkowanie kolejnych kroków, ma wpływ na uzyskiwaną precyzję predykcji. Zwłaszcza w modelu nieliniowym, zbyt duże kroki obliczeniowe w procesie uczenia mogą spowodować trudność w znalezieniu minimum globalnego. Zbyt duża ilość kroków wydłuża proces i obciąża jednostkę obliczeniową. To zjawisko jest minimalizowane przez zastosowanie właściwego algorytmu powiązanego z wielkością kroku.

Pojedynczy cykl symulacji na sieci, obejmujący wprowadzenie wszystkich danych do zbioru uczącego i obliczenie błędu propagacji, nazywany jest epoką.

Jak wspomniano na początku rozdziału rozpatrywany przypadek to model sieci neuronowej z regułami nauczania nadzorowanego. O zakończeniu symulacji decyduje osoba nadzorująca cały proces. Zakończenie następuje po realizacji zadanej liczby epok przez model, przy uzyskaniu założonej (akceptowalnej) wielkości błędu lub w sytuacji, gdy kolejne symulacje nie powodują zmniejszenia wielkości błędu.

Jeśli sieć nie osiąga zakładanej wielkości błędu, należy zmienić liczbę neuronów w warstwie ukrytej lub dodać kolejną warstwę.

Właściwej oceny jakości sieci neuronowej można dokonać przy wykorzystaniu danych walidacyjnych. Do tego celu dane użyte dzieli się na dwie lub trzy grupy. Może to być tylko zbiór uczący i walidacyjny, a można dodatkowo wydzielić zbiór testowy. Generalnie zbiór testowy tworzy się w przypadku bardzo dużej ilości rekordów dostępnych do symulacji. Przy pomocy zbioru danych służących do walidacji, sprawdza się, czy nie nastąpiło przeuczenie sieci. Charakteryzuje się to wzrostem błędu symulacji sieci na dane walidacyjne w stosunku do błędu uzyskanego przy zbiorze uczącym.

W konsekwencji należy przemodelować sieć w kierunku redukcji neuronów lub warstw. Zbiór testowy może w ostateczności potwierdzić poprawność przyjętego modelu, ale można go użyć tylko raz.

4 PREDYKCJA ZUŻYCIA ENERGII Z WYKORZYSTANIEM PAKIETU PROGRAMOWEGO MATLAB NA PRZYKŁADZIE CYWILNEGO PORTU LOTNICZEGO

4.1 Przyjęte założenia dla budowanego modelu

W niniejszej dysertacji przyjęto model predykcji zużycia energii oparty o sieci neuronowe. Wykorzystano do tego celu oprogramowanie MATLAB. Zawiera ono między innymi bibliotekę *Neural Network Toolbox*, umożliwiającą budowę i wykorzystanie sieci neuronowych do prognozowania. Do tego celu można wykorzystać gotowe narzędzia, jak i posłużyć się podstawową linią komend.

Aby zbudować sieć neuronową należy wykonać następujące kroki:

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

Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, dobór sieci neuronowej zależy od oczekiwanego sygnału wyjściowego oraz liczby zdefiniowanych zmiennych, które wpływają na sygnał wyjściowy oraz od liczby próbek dostępnych do przeprowadzenia procesu regresji.

W tym przypadku posłużono się danymi uzyskanymi ze strony portu lotniczego San Francisco¹³¹. 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.

Zgodnie z treścią rozdziału dotyczącego przedstawienia problemu naukowego, dane meteorologiczne dla tego portu lotniczego zostały pozyskane ze źródeł

¹³¹ <https://data.sfgov.org/d/gciv-3mzf/visualization>, wejście 12.09.2021

satelitarnych NASA (NASA *Prediction of Worldwide Energy Resources* - NASA POWER) z lat 2013-2019.

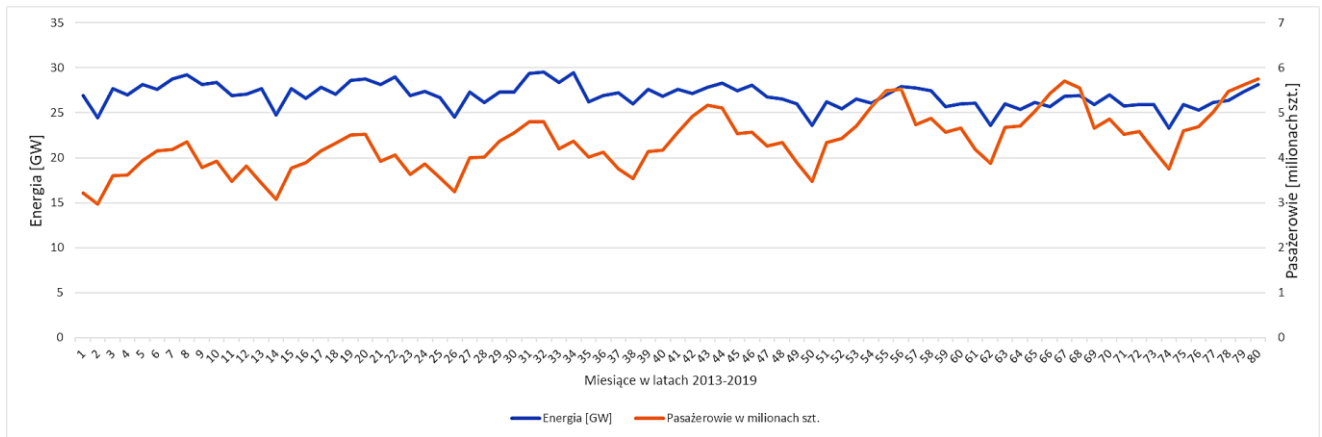
Na tej podstawie zbudowano zagregowany zestaw danych obejmujący następujące dane z lat 2013-2019 z rozbiciem na poszczególne miesiące:

- 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);
- miesięczna 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 (%).

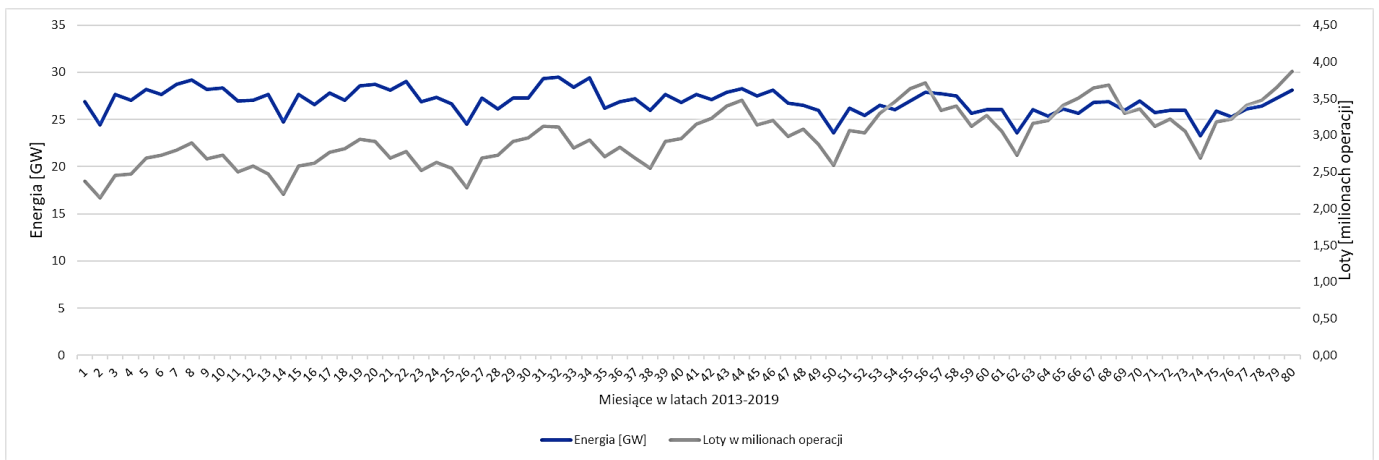
Powyższe dane zostały zagregowane w tabeli przedstawionej w załączniku nr 1. Zostały one poddane analizie wpływu poszczególnych zmiennych na zużycie energii elektrycznej przez lotnisko.

Na rys. 45 przedstawiona jest zależność zużycia energii w porcie lotniczym SF na przestrzeni lat 2013-2019 (kolor niebieski) w relacji do liczby obsłużonych pasażerów (kolor pomarańczowy). Wykres potwierdza silną zależność zużycia energii od tej zmiennej.

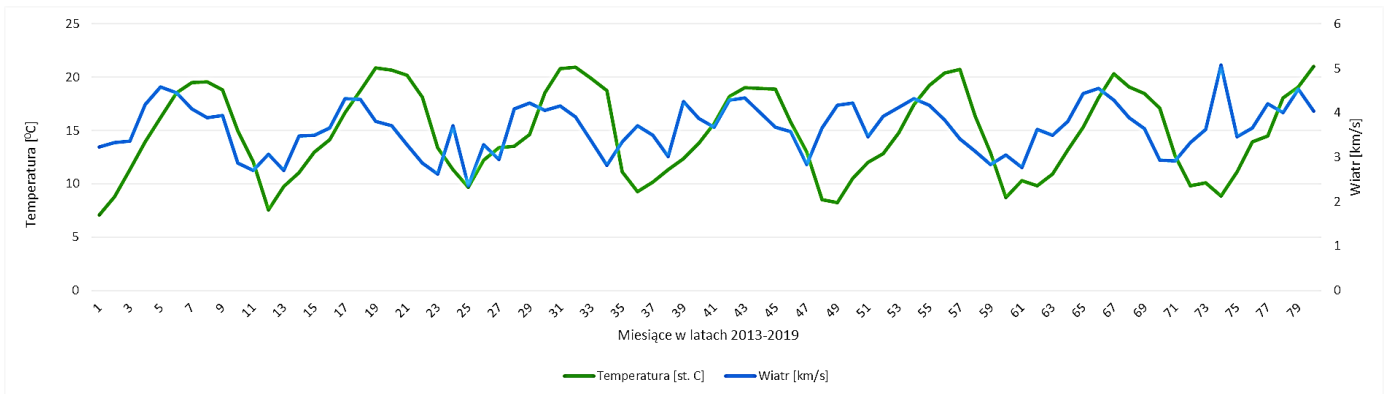
Na rys. 46 przedstawiono podobną zależność zużycia energii od liczby wykonanych operacji lotniczych. Na rys. 47 pokazano charakterystyki zmian parametrów temperatury i wiatru w tym samym przedziale czasu. Wyraźnie zaznaczona jest korelacja zmian prędkości wiatru oraz zużycia energii z poprzedniego wykresu. Nieco słabiej zarysowana jest zależność od wiatru.



Rys. 45 Zależność zużycia energii w porcie lotniczym SF od ilości obsługiwanych pasażerów w latach 2013-2019



Rys.46 Zależność zużycia energii w porcie lotniczym SF od ilości lotów w latach 2013-2019



Rys. 47 Charakterystyka zmian wiatru i temperatury w czasie za lata 2013-2019 dla portu lotniczego SF

Powyższe zestawienie graficzne danych wskazuje, że wyselekcjonowane dane z dużym prawdopodobieństwem są przydatne jako dane wejściowe do modelowania predykcji z wykorzystaniem historycznych danych zużycia energii. Można założyć, że czynniki operacyjne i pogodowe stworzą właściwy zbiór zmiennych do budowy modelu prognozowania w oparciu o sieci neuronowe.

Wartości ujęte w zestawieniu (załącznik 1) tworzą macierz danych wejściowych i wyjściowych, która w środowisku MATLAB posłuży do predykcji z wykorzystaniem wielowarstwowej sieci jednokierunkowej (perceptronu wielowarstwowego). Jest to najlepiej opisana i najczęściej wykorzystywana w praktyce sieć neuronowa.

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 różnicy między wartościami zadanymi a rzeczywistymi 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.

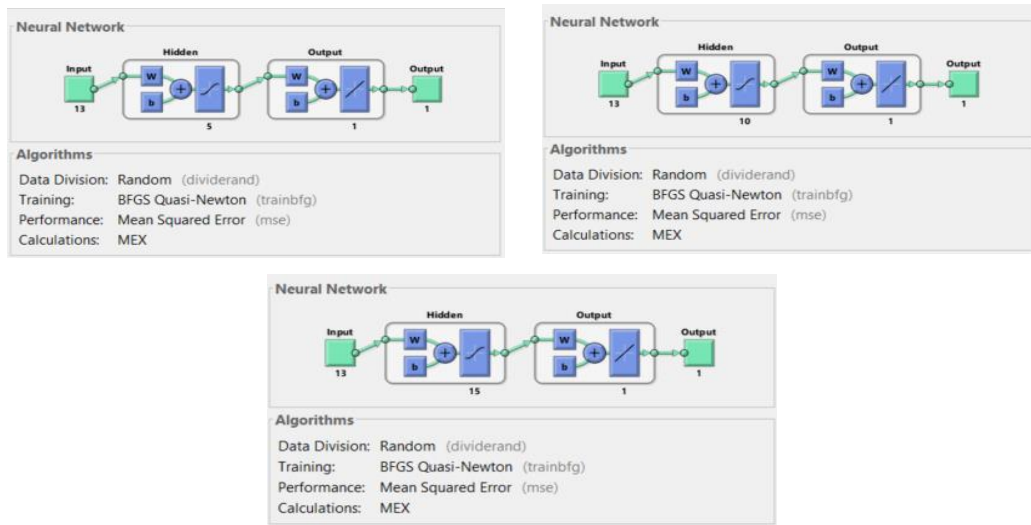
Uzyskane wyniki oceniono przy pomocy:

- 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;

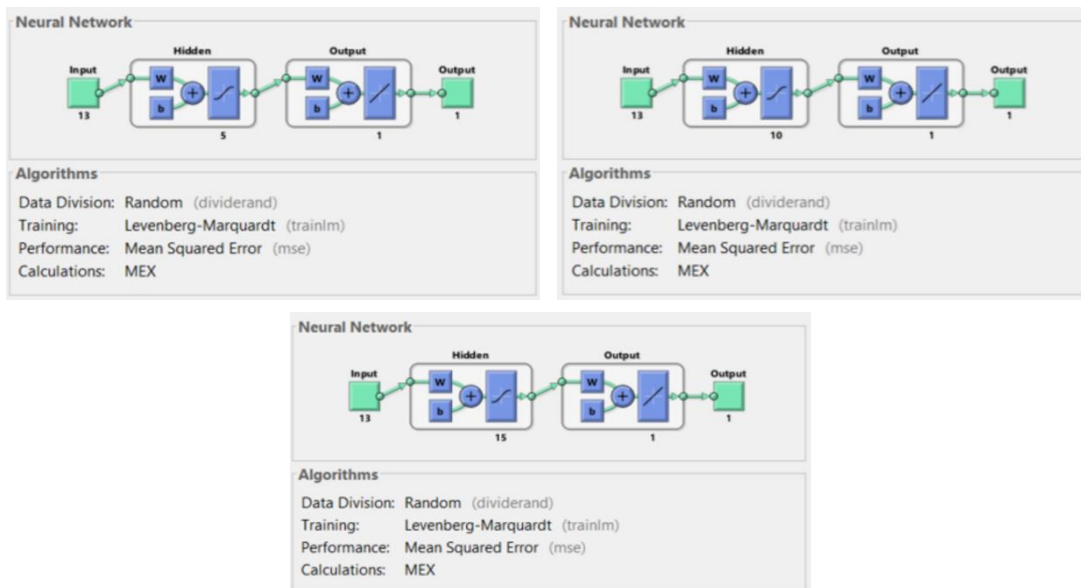
— błędu średniokwadratowego $RMSE$, wskazującego na dokładność prognozy w zadanym modelu.

4.2 Wyniki przeprowadzonych badań

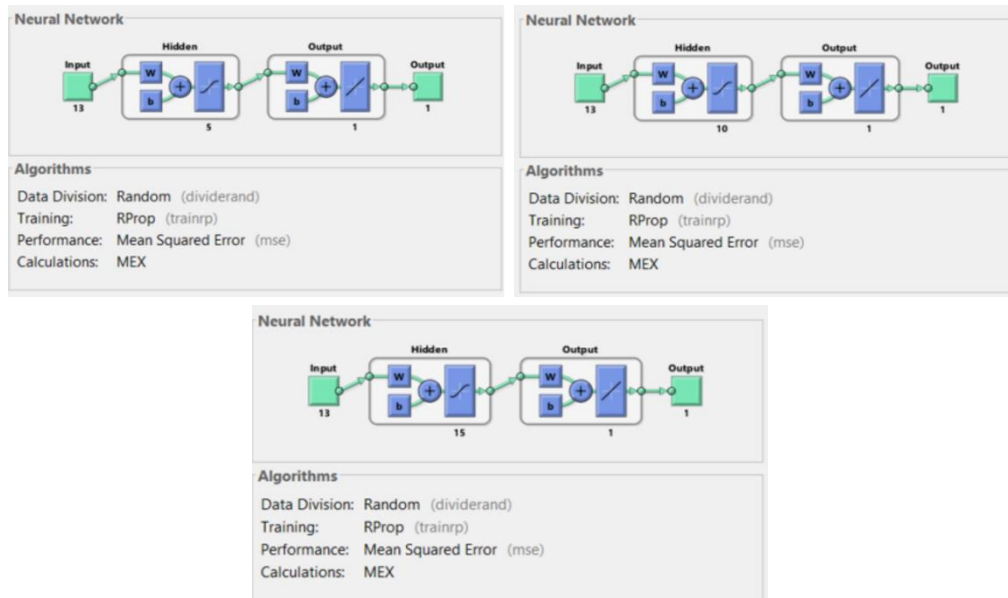
Modele wielowarstwowych sieci jednokierunkowych o sigmoidalnych funkcjach aktywacji neuronów wykorzystywanych w badaniu przedstawiono na rys. 48, 49, 50 i 51.



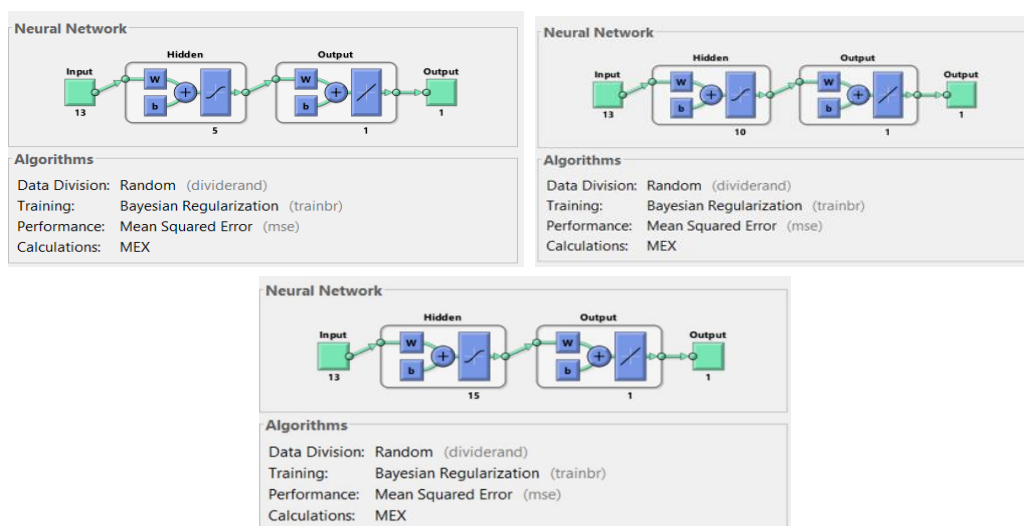
Rys. 48 Perceptron wielowarstwowy jednokierunkowy z algorytmem uczenia BFGS Quasi-Newton i różnymi liczbami neuronów w warstwie ukrytej



Rys. 49 Perceptron wielowarstwowy jednokierunkowy z algorytmem uczenia Levenberg-Marquardt i różnymi liczbami neuronów w warstwie ukrytej



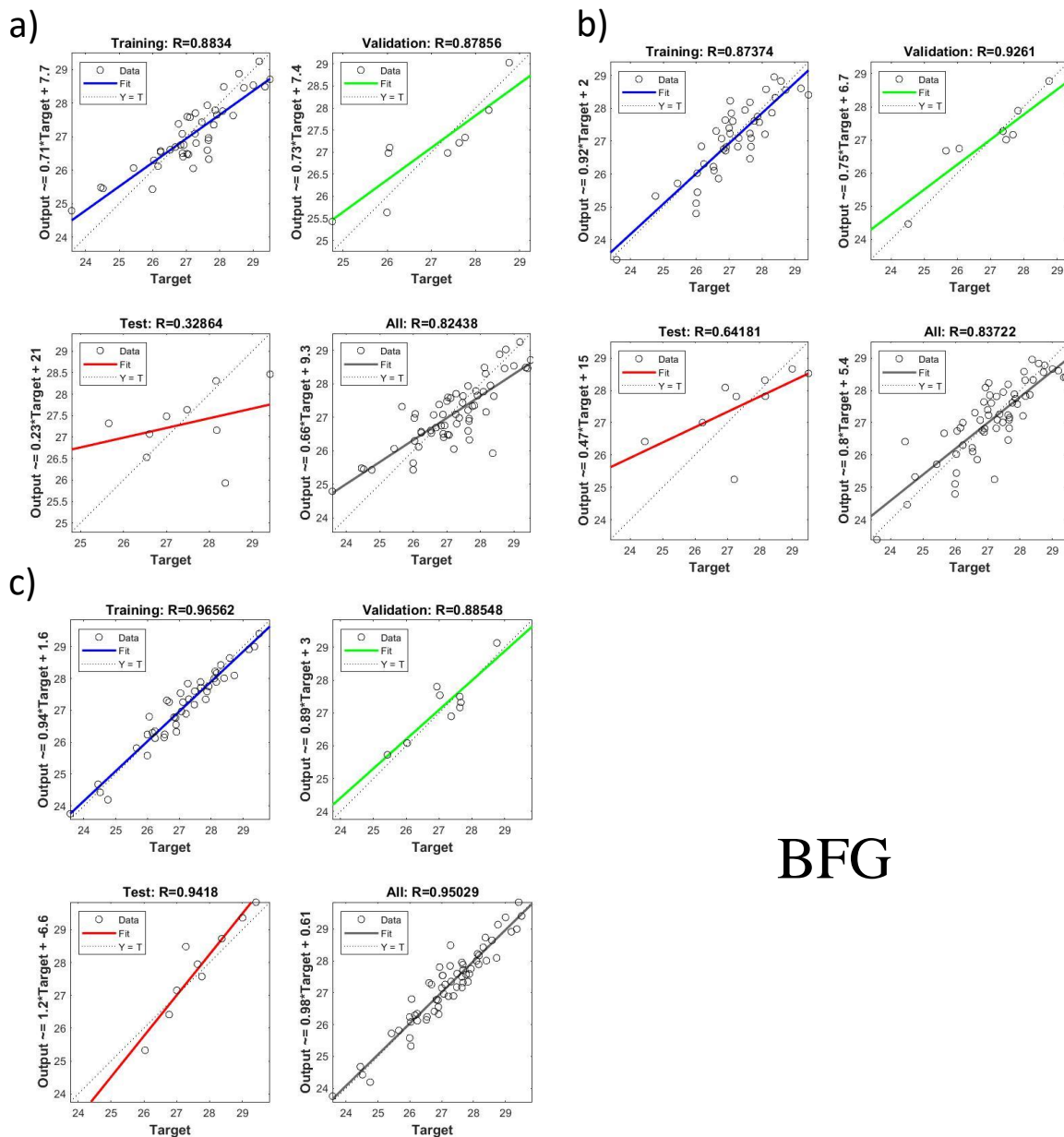
Rys. 50 Perceptron wielowarstwowy jednokierunkowy z odpornym algorytmem propagacji wstecznej RP i różnymi liczbami neuronów w warstwie ukrytej



Rys. 51 Perceptron wielowarstwowy jednokierunkowy z algorytmem uczenia Bayesian Regularization i różnymi liczbami neuronów w warstwie ukrytej

Na rys. 52, 53, 54 i 55 przedstawiono porównawcze zestawienie błędów regresji uzyskane w badaniach dla poszczególnych zbiorów danych.

Wykresy błędu regresji dla poszczególnych wersji sieci z algorytmem uczenia BFG (rys. 52) pokazują wyraźną zależność wielkości tego błędu od liczby neuronów w warstwie ukrytej. Widać wyraźnie zbliżanie się wskaźnika R do 1 przy zwiększaniu liczby neuronów w warstwie ukrytej. Rozkład wyników dla zbioru uczącego, walidacyjnego i testowego układu się coraz bliżej linii 45^0 . Ogólny wskaźnik R dla 15 neuronów w warstwie ukrytej wynosi 0,95.



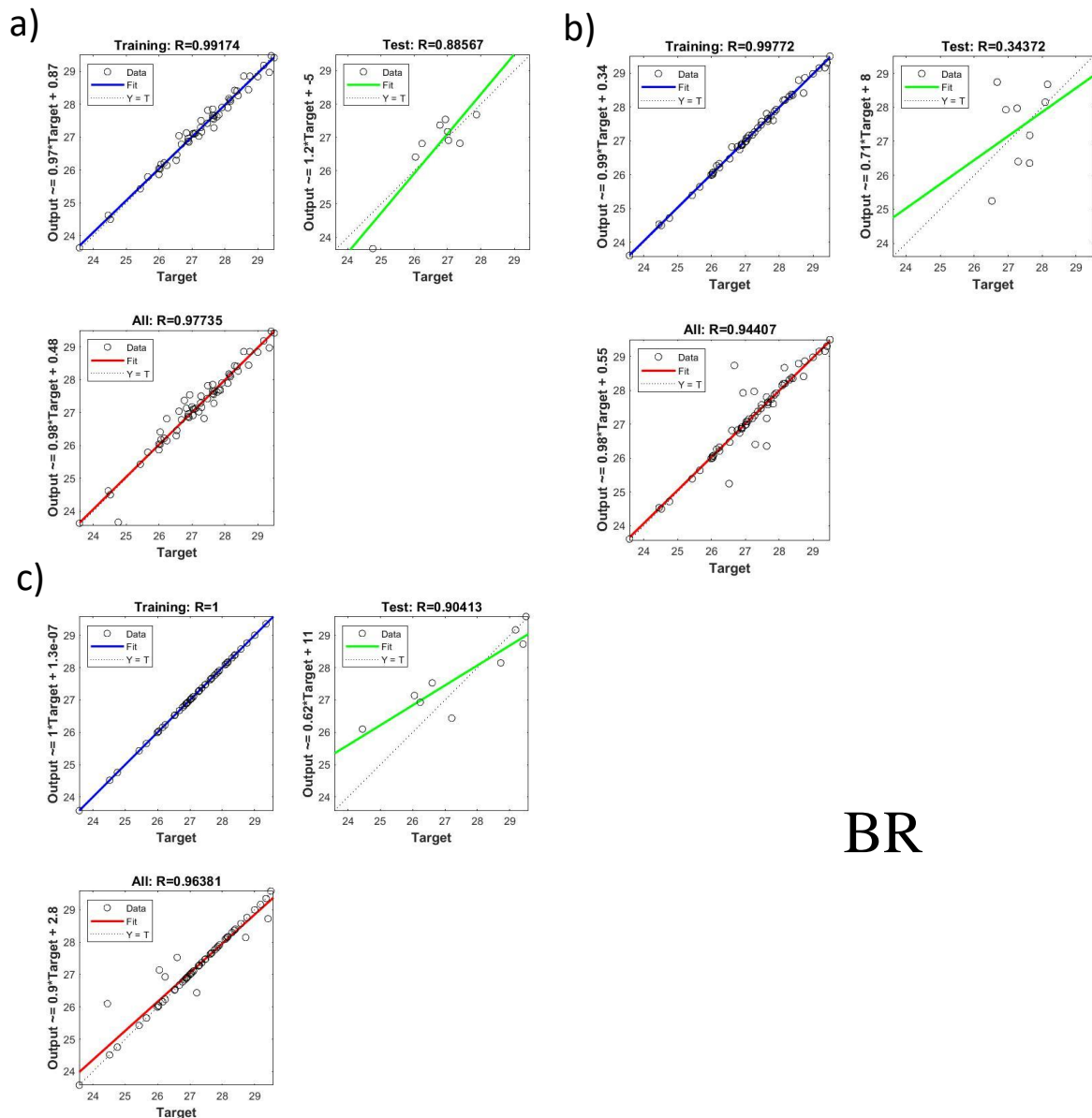
BFG

Rys. 52 Zestawienie wykresów błędu regresji dla sieci neuronowej jednokierunkowej z jedną warstwą ukrytą i różnymi liczbami neuronów a) 5, b) 10 i c) 15, przy zastosowaniu algorytmu BFGS Quasi-Newtona dla zbioru uczącego, walidacyjnego i testowego

Dla algorytmu uczenia BR (rys. 53) uzyskano najlepsze wskaźniki regresji. Wyniki te potwierdzają zaletę tego algorytmu, polegającą na wysokiej zdolności do generalizacji i braku potrzeby zastosowania zbioru walidacyjnego, którego wielkość ma wpływ na zdolności predykcyjne trenowanego modelu¹³². Algorytm wykorzystuje zbiór uczący i testowy. W tym przypadku, odwrotnie jak dla algorytmu BFG, najlepsze

¹³² 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, str 7

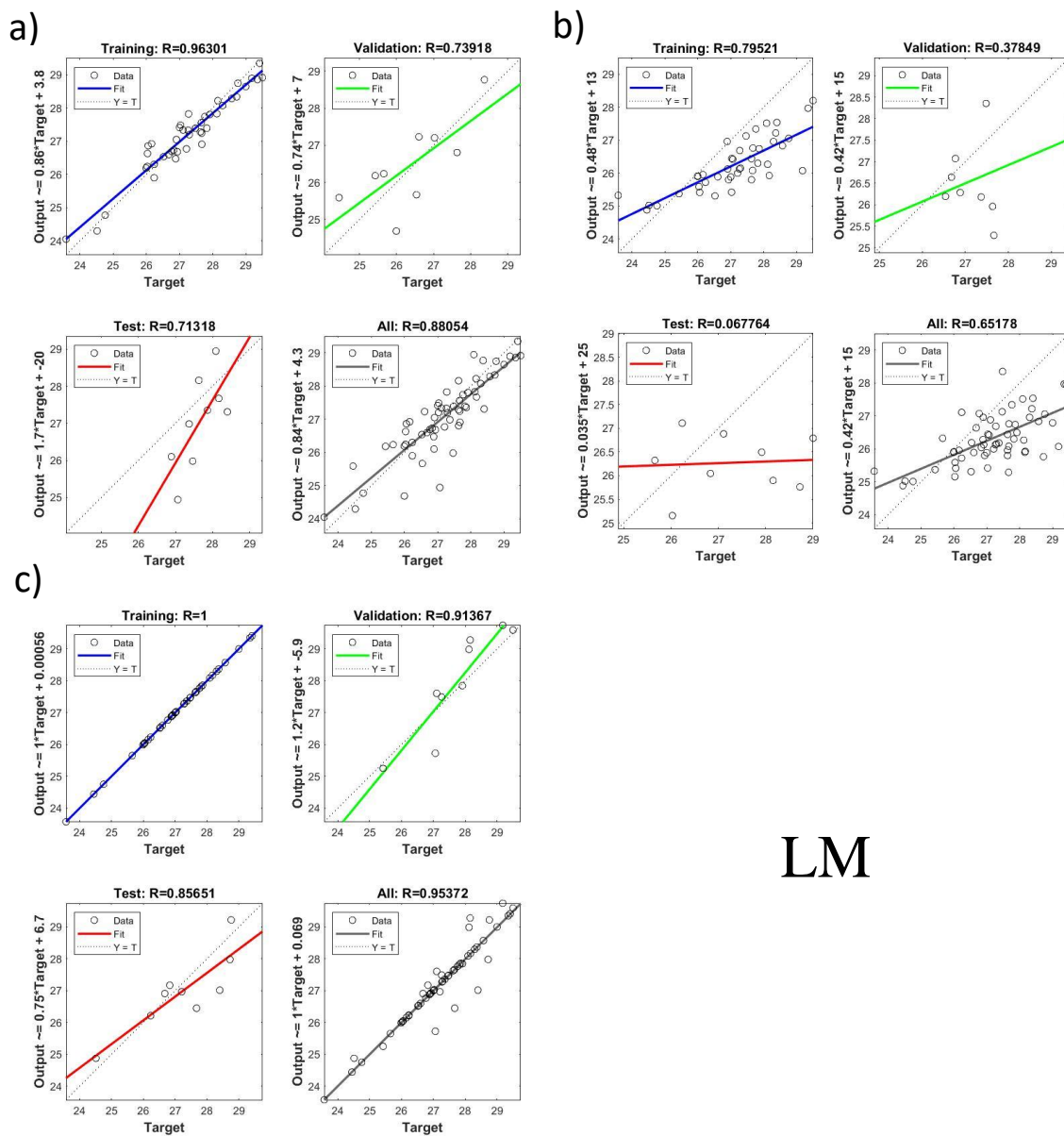
rezultaty uzyskano przy najmniejszej liczbie neuronów (5) w warstwie ukrytej. Przy 15 neuronach widać możliwe przetrenowanie modelu objawiające się uzyskaniem wskaźnika dopasowania 1 dla zbioru uczącego i 0,9 dla zbioru testowego.



BR

Rys. 53 Zestawienie wykresów błędu regresji dla sieci neuronowej jednokierunkowej z jedną warstwą ukrytą i różnymi liczbami neuronów a) 5, b) 10 i c) 15, przy zastosowaniu algorytmu Bayesian Regularization dla zbioru uczącego i testowego

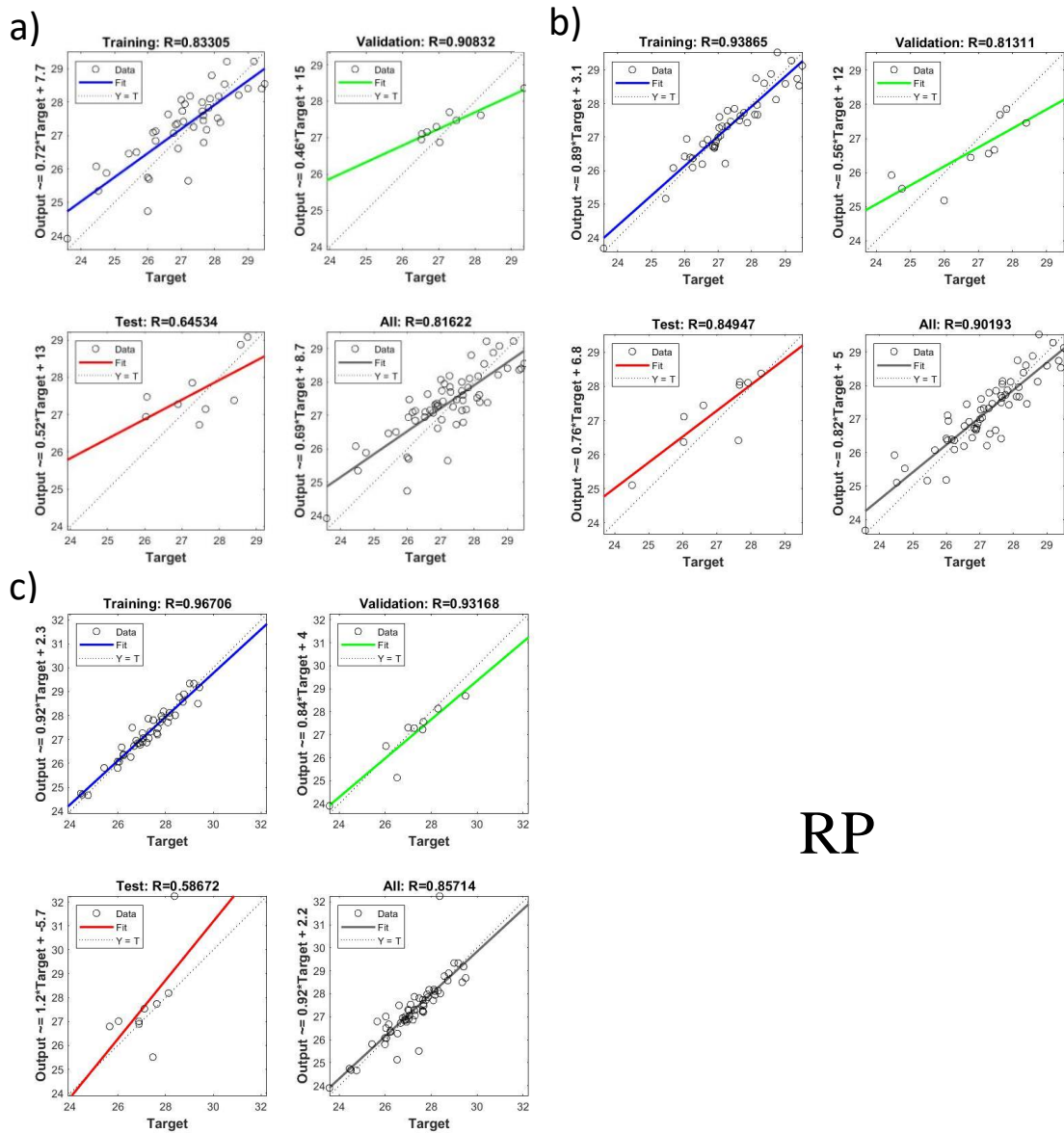
Dla algorytmu LM (rys. 54) uzyskane wyniki na wyjściu sieci dla zbioru walidacyjnego i testowego, przy 5 i 10 neuronach w warstwie ukrytej, są niewystarczające. Dodatkowo przy 5 neuronach ogólny wskaźnik regresji 0,88 jest względnie dobry, przy znacznie słabszych wskaźnikach i kątach odchylenia dla zbioru walidacyjnego i testowego, odpowiednio 0,73 i 0.71. Najlepszy wynik uzyskano dla sieci z 15 neuronami, gdzie uzyskano wysoki stopień dopasowania dla wszystkich zbiorów wynoszący 0,91367, ale $R=1$ dla zbioru uczącego wskazuje na możliwe występowanie zjawiska przetrenowania.



LM

Rys. 54 Zestawienie wykresów błędu regresji dla sieci neuronowej jednokierunkowej z jedną warstwą ukrytą i różnymi liczbami neuronów a) 5, b) 10 i c) 15, przy zastosowaniu algorytmu Levenberg-Marquardt dla zbioru uczącego, walidacyjnego i testowego

Dla algorytmu uczenia RP (rys. 55) błąd regresji jest optymalny dla sieci z 10 neuronami w warstwie ukrytej. Dalsze zwiększanie liczby neuronów pogarsza uzyskiwane rezultaty i zwiększa różnice w dopasowaniu w zbiorze walidacyjnym i testowym.



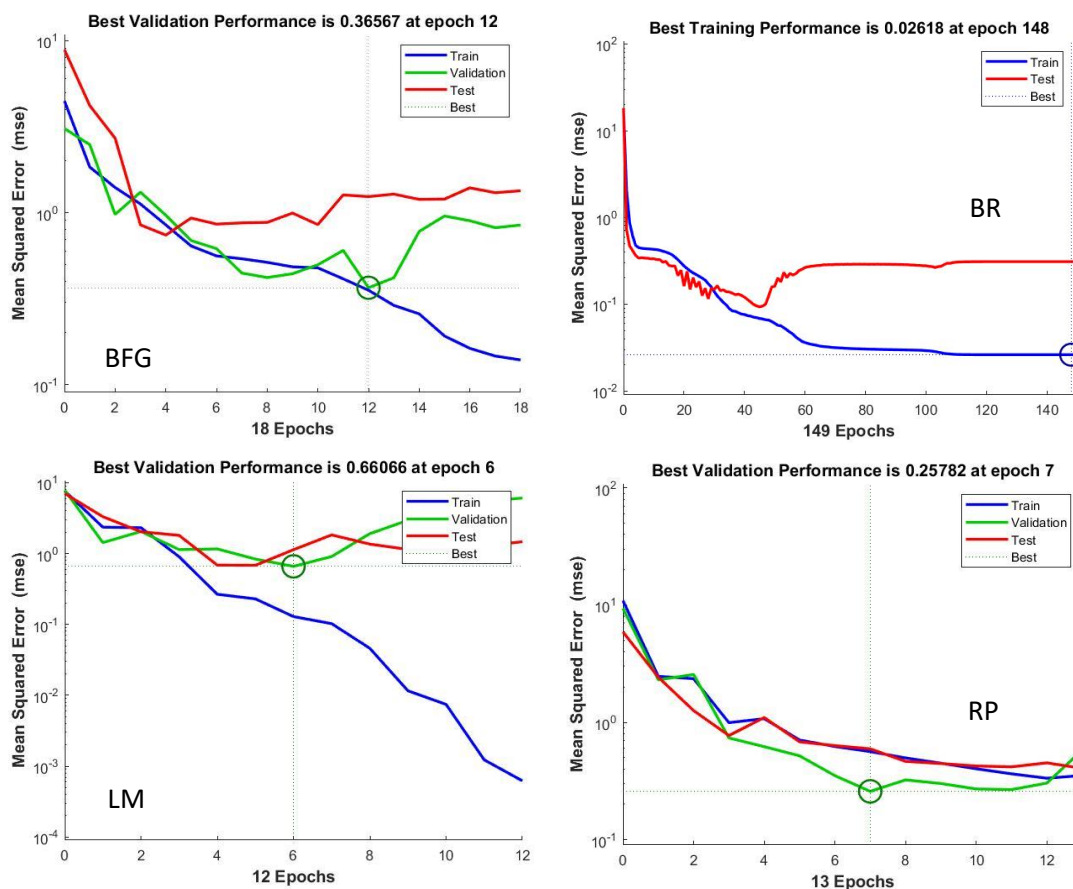
RP

Rys. 55 Zestawienie wykresów błędu regresji dla sieci neuronowej jednokierunkowej z jedną warstwą ukrytą i różnymi liczbami neuronów a) 5, b) 10 i c) 15, przy zastosowaniu algorytmu Resilient Bacpropagation dla zbioru uczącego, walidacyjnego i testowego

Reasumując, ocena wyników przeprowadzonych badań w oparciu o błąd regresji najlepiej wypadła dla algorytmu BR.

Oceny jakości przetwarzania w sieci dokonano na podstawie wykresów obrazujących zmianę charakterystyki błędu średniokwadratowego dla poszczególnych zbiorów. O jakości decyduje wielkość błędu uzyskana dla zbioru walidacyjnego w wyniku procesu uczenia. Trening jest zatrzymywany, gdy w kolejnych sześciu krokach uczenia błąd walidacji ulega zwiększeniu.

Charakterystyki błędu walidacji dla sieci z 5, 10 15-toma neuronami w warstwie ukrytej, dla poszczególnych algorytmów uczenia przedstawione zostały na rys. 56, 57, 58 i 59.

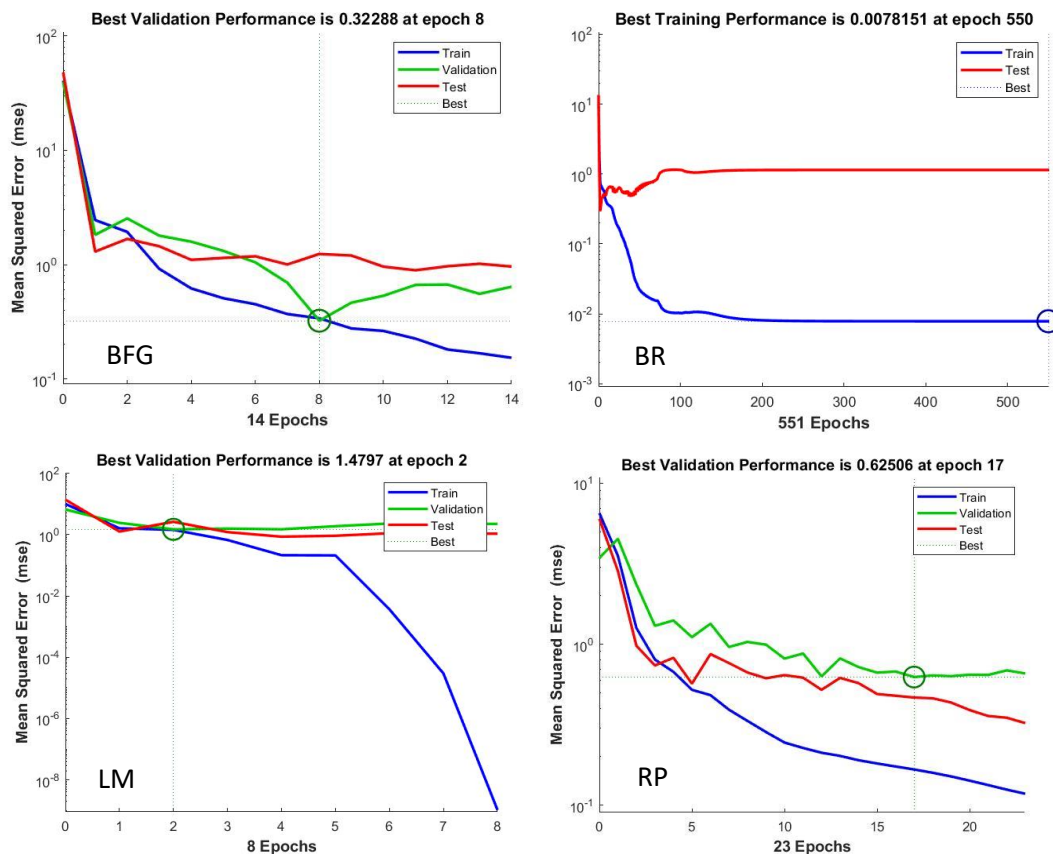


Rys. 56 Ocena jakości walidacji dla sieci neuronowej wielowarstwowej z jedną warstwą ukrytą i 5-ciuoma neuronami, przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP

Dla warstwy ukrytej z pięcioma neuronami (rys. 56) najmniejszy błąd *MSE* zbioru walidacyjnego uzyskany został dla algorytmu RP i wyniósł 0,25782 przy siódmym cyklu. W przypadku algorytmu BR, zaimplementowanego w MATLAB-ie mechanizm walidacji wbudowany jest w algorytm. Brak jest zbioru walidacyjnego, stąd

sprawdzenie jakości walidacji odbywa się poprzez śledzenie błędu *MSE*, a zatrzymanie procesu nauczania następuje w momencie wzrostu tego błędu, podobnie jak dla pozostałych algorytmów. Dla tego algorytmu, w tym przypadku uzyskano najmniejszy $MSE=0,02618$ w 148 cyklu uczenia.

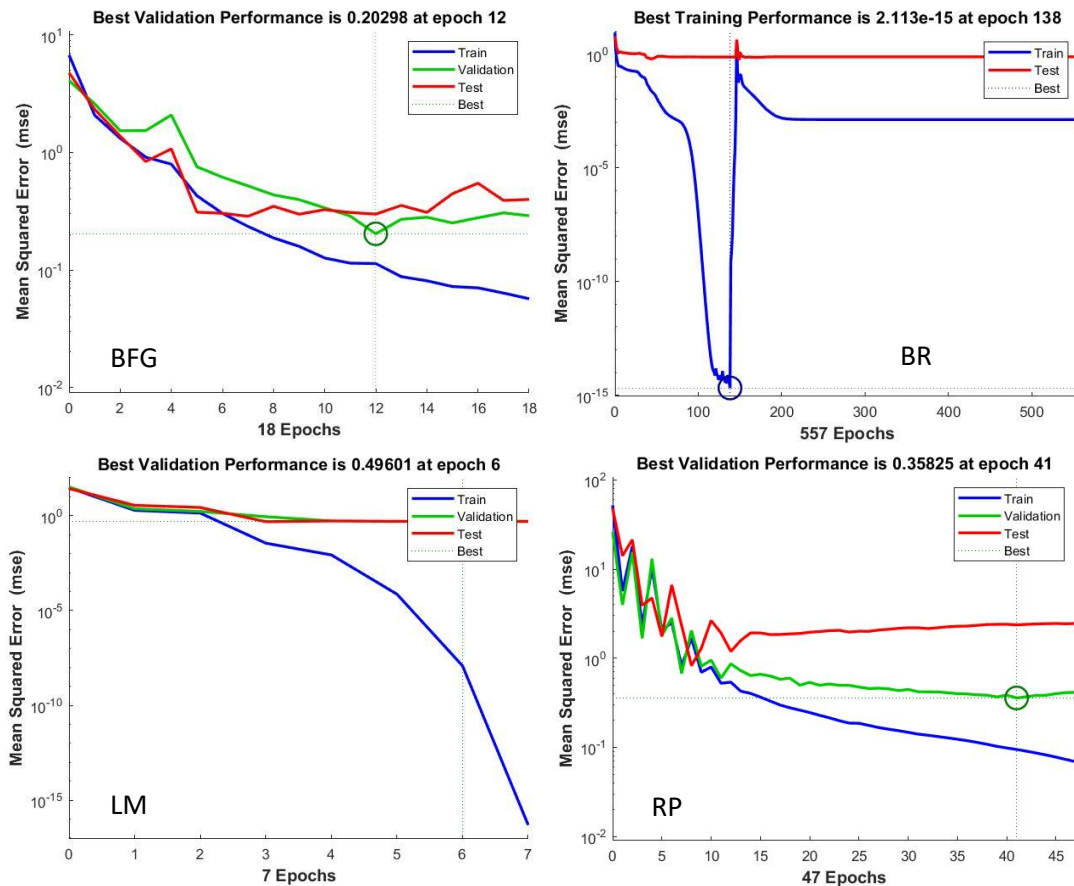
Charakterystyki błędu dla zbiorów uczącego, testowego i walidacyjnego w zadanej sieci w pełni odzwierciedlają różnice w błędzie korelacji dla tych zbiorów w algorytmach BFG, LM i RP. W przypadku algorytmu BFG i LM widać wyraźnie gwałtowny spadek błędu *MSE* dla zbioru uczącego odpowiednio po 12 i 6 cyklu nauczania i rosnącą różnicę w stosunku do charakterystyk błędu dla zbioru walidacyjnego i testowego, świadcząca o przeuczeniu sieci.



Rys. 57 Ocena jakości walidacji dla sieci neuronowej wielowarstwowej z jedną warstwą ukrytą i 10-cioma neuronami, przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP

Dla warstwy ukrytej z 10-cioma neuronami (rys. 57) *MSE* uległ poprawie dla algorytmów BFG i BR, a pogorszeniu dla algorytmu LM i RP. Parametry algorytmu LM wskazują na najwyższy błąd *MSE* dla wszystkich zbiorów, co również w pełni

odzwierciedlają wykresy błędu regresji dla tych zbiorów, co przedstawiono na rys. 54. W algorytmie BR, mimo bardzo dobrej charakterystyki błędu MSE dla zbioru uczącego, nastąpiło niewielkie pogorszenie charakterystyki (wzrost MSE) dla zbioru testowego, a tym samym wzrosła różnica między przebiegiem obu charakterystyk.

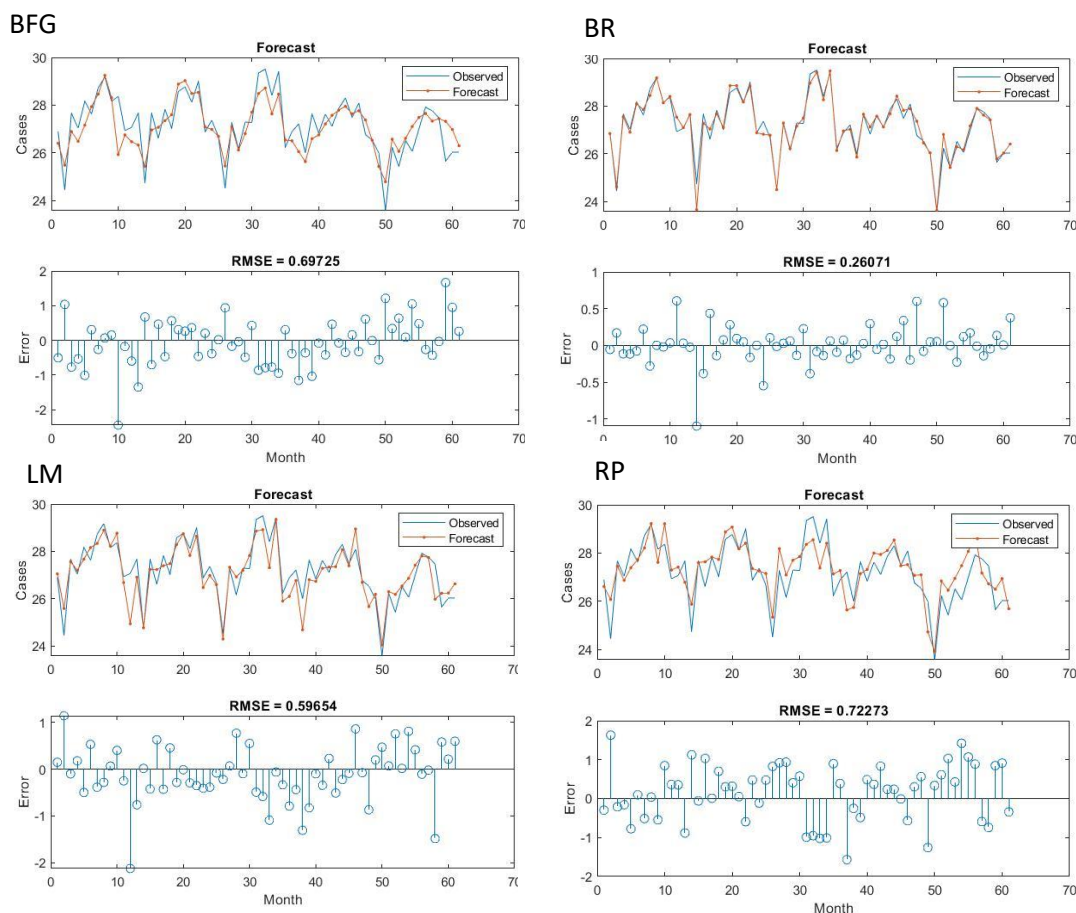


Rys. 58 Ocena jakości walidacji dla sieci neuronowej wielowarstwowej z jedną warstwą ukrytą i 15-toma neuronami, przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP

Przy piętnastu neuronach w warstwie ukrytej (rys. 58) nastąpił spadek błędu MSE dla algorytmu LM do poziomu 0,49601 w szóstym cyklu (po wzroście przy 10 neuronach). Kolejne cykle uczenia powodują gwałtowny spadek błędu dla zbioru uczącego i rosnącą różnicę dla charakterystyk pozostałych zbiorów, wskazującą na możliwość przetrenowania sieci. Algorytm BFG wykazał kolejną poprawę charakterystyk błędu, dla wszystkich zbiorów, przy zwiększaniu liczby neuronów w warstwie ukrytej. Nieznacznemu pogorszeniu uległy wyniki dla algorytmu RP. Porównanie z poprzednimi charakterystykami wskazuje, że im mniejsza liczba

neuronów warstwy ukrytej, tym błąd przetwarzania sieci przy użyciu algorytmu RP jest mniejszy. W przypadku algorytmu BR uzyskano najniższy błąd MSE dla zbioru uczącego wynoszący $2.113 \cdot 10^{-15}$ w szóstym cyklu uczenia, a następnie charakterystyki powróciły do poziomów podobnych dla wcześniejszych konfiguracji sieci.

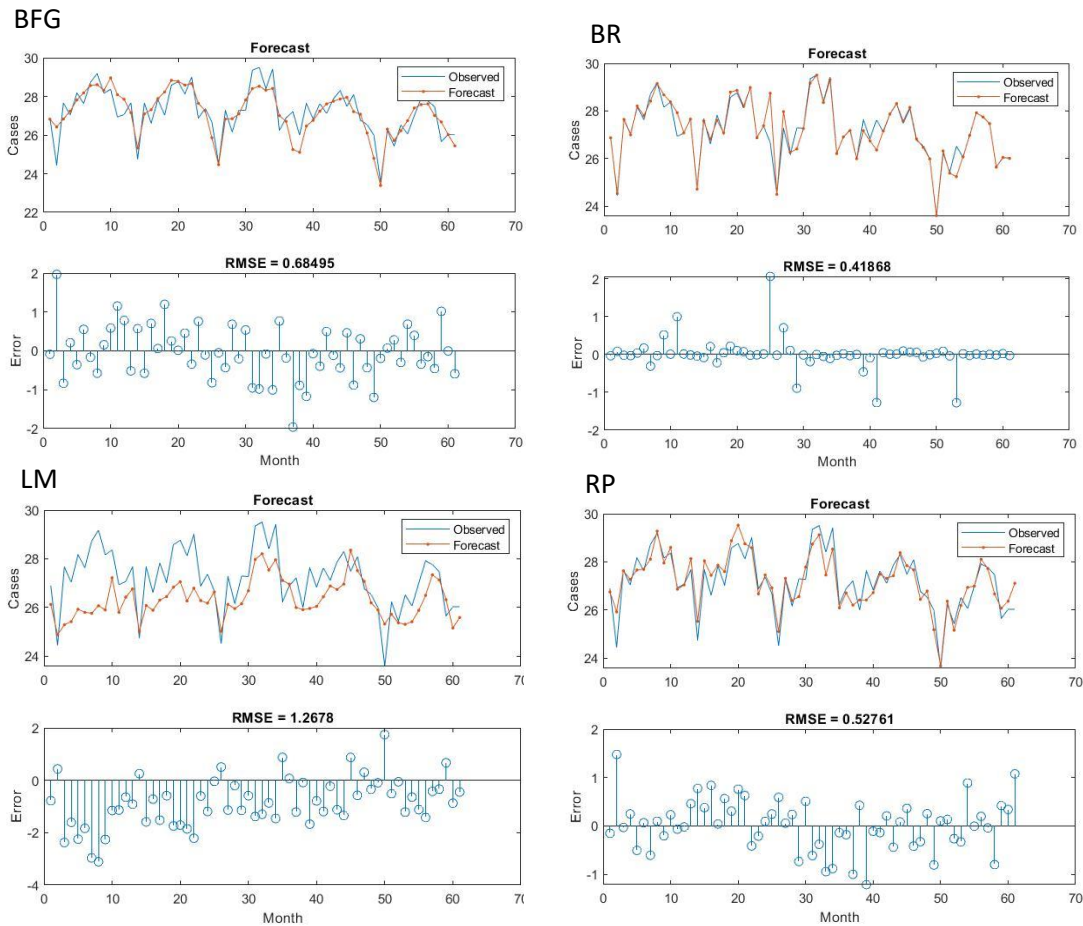
Jakość dopasowania wyniku symulowanego do wyniku zmierzonego (dane zbioru rzeczywistego pomiarów zużycia energii w porcie lotniczym SF), przy pomocy grafiki 2D i błędu RMSE, ilustrują uzyskane w wyniku badań wykresy na rys. 59, 60 i 61.



Rys. 59 Zestawienie wykresów dopasowania wyniku symulowanego i zmierzonego oraz błędu średniokwadratowego dla badania z wykorzystaniem sieci wielowarstwowej jednokierunkowej z 5-cioma neuronami przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP

Powyższe wykresy (rys. 59) dla sieci z pięcioma neuronami w warstwie ukrytej pokazują, że najlepsze dopasowanie uzyskano przy wykorzystaniu algorytmu BR, gdzie *RMSE* wyniósł 0,26071. Dla pozostałych algorytmów wyniki dopasowania są znacznie

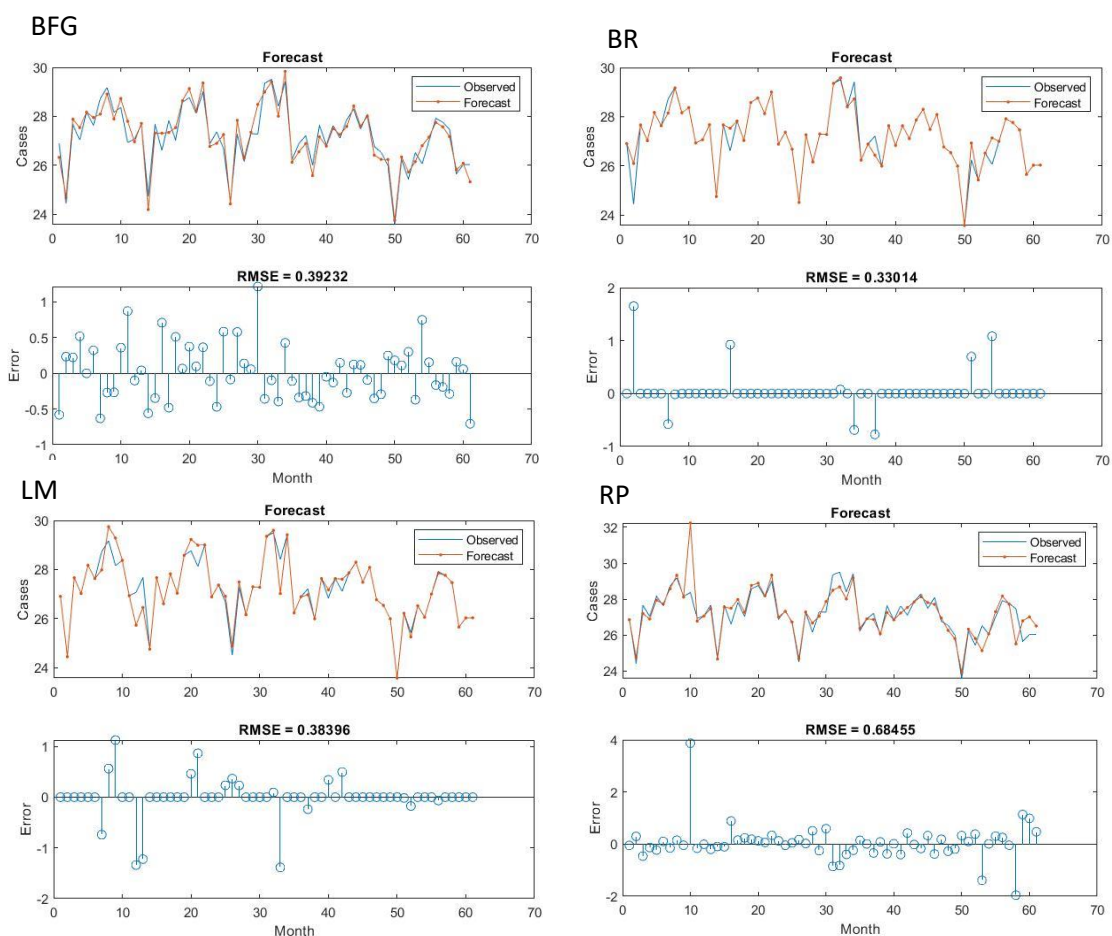
gorsze. Rezultat jest zgodny z wcześniejszym opisem wyników dla regresji i błędu walidacji.



Rys. 60 Zestawienie wykresów dopasowania wyniku symulowanego i zmierzonego oraz błędu średniokwadratowego dla badania z wykorzystaniem sieci wielowarstwowej jednokierunkowej z 10-cioma neuronami przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP

Przy 10 neuronach w warstwie ukrytej (rys. 60) zdecydowany brak dopasowania występuje w algorytmie LM, co wynika również ze wcześniej analizowanych wyników (najniższy R i MSE). Pogarsza się dopasowanie w algorytmie BR ($RMSE$ rośnie z wartości 0,26071 do 0,41868), a poprawie ulega wynik dla algorytmu BFG (nieznacznie) i RP. Algorytm BR wciąż daje najlepszy wynik ze wszystkich zastosowanych wariantów.

Na rys. 61 przedstawiono wyniki dla sieci z 15-toma neuronami w warstwie ukrytej.

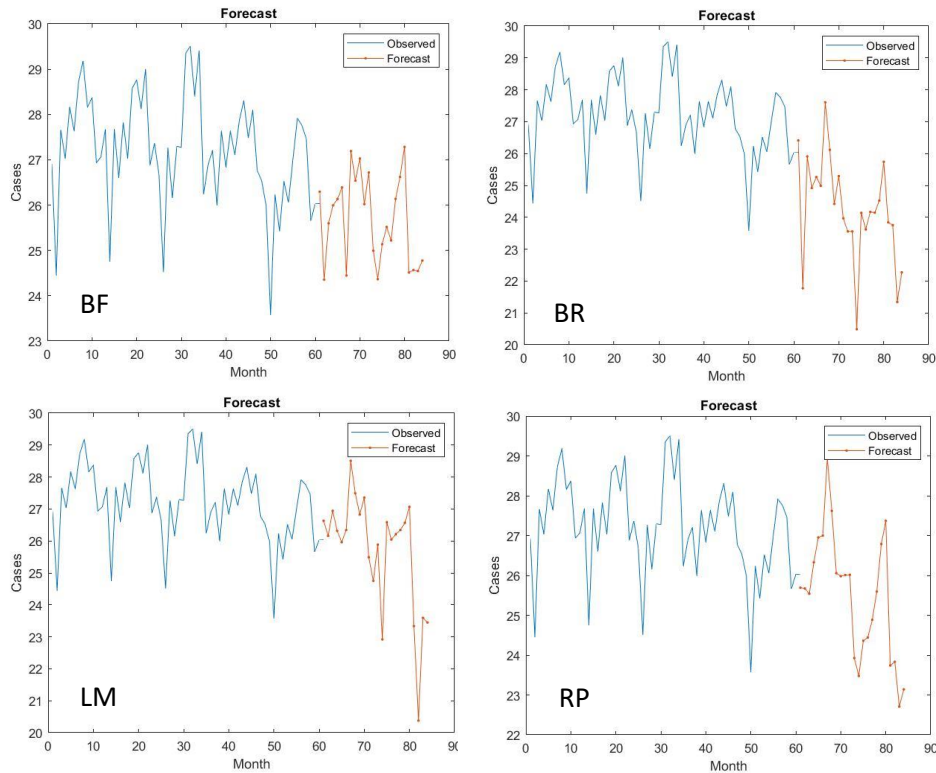


Rys. 61 Zestawienie wykresów dopasowania wyniku symulowanego i zmierzonego oraz błędu średniokwadratowego dla badania z wykorzystaniem sieci wielowarstwowej jednokierunkowej z 15-toma neuronami, przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP

W tym przypadku uzyskano najlepszy błąd dopasowania również dla algorytmu BR, ale BFG uzyskało znacznie lepszy wynik niż w przypadku sieci o mniejszej liczbie neuronów w warstwie ukrytej. Podobne wyniki odnotowano dla algorytmu LM (zdecydowanie najlepsze dopasowanie w tym badaniu). Pogorszeniu uległy wyniki dla algorytmu RP.

Ostatnim krokiem w ocenie uzyskanych wyników jest analiza uzyskanej w oparciu o zbudowaną sieć neuronową predykcji. W oparciu o dane rzeczywiste pomierzone w przeszłości (szeregi danych czasowych), zostały wykonane kroki w przyszłość.

Na rys. 62,63 i 64 pokazano wykresy, na których linią niebieską oznaczone są charakterystyki zużycia energii portu lotniczego rzeczywiste, a linią czerwoną predykcja zużycia energii uzyskana przy użyciu zastosowanych modeli sieci neuronowej i algorytmów uczenia.



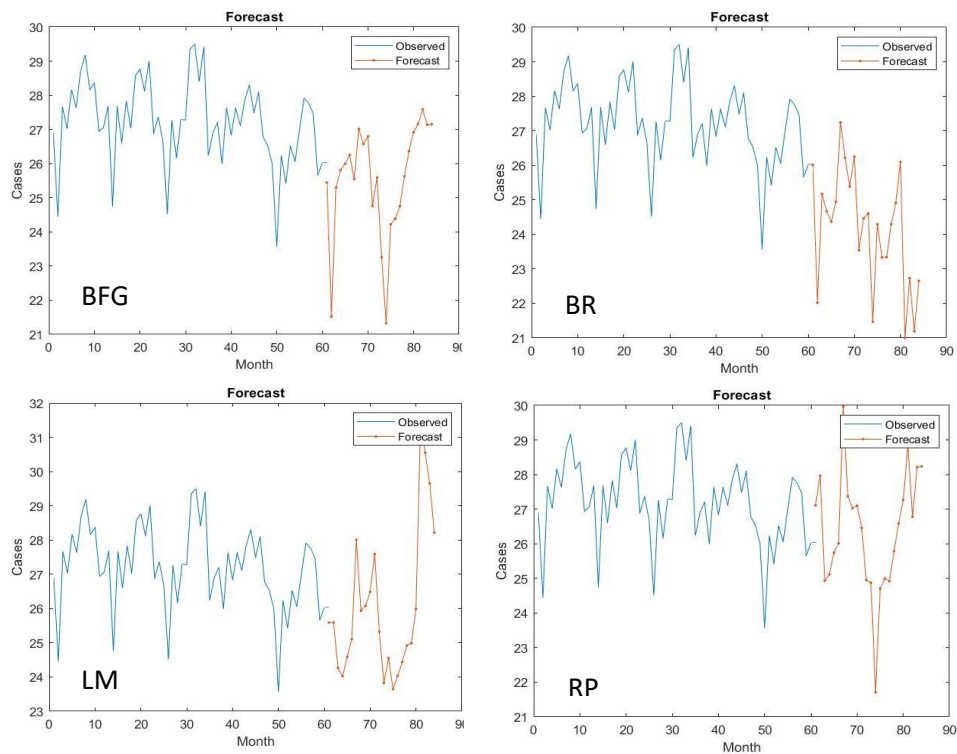
Rys. 62 Wykresy predykcji zużycia energii w modelu perceptronu wielowarstwowego jednokierunkowego z jedną warstwą ukrytą i 5-ciuoma neuronami przy zastosowaniu czterech algorytmów uczenia, przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP

Widać wyraźnie, że w przypadku modelu sieci z rysunku 62 algorytm BR dokonuje najlepszej predykcji, a pozostałe ze względu na wcześniej opisane słabe wyniki regresji, błędu walidacji i dopasowania, uzyskują słabszy wynik.

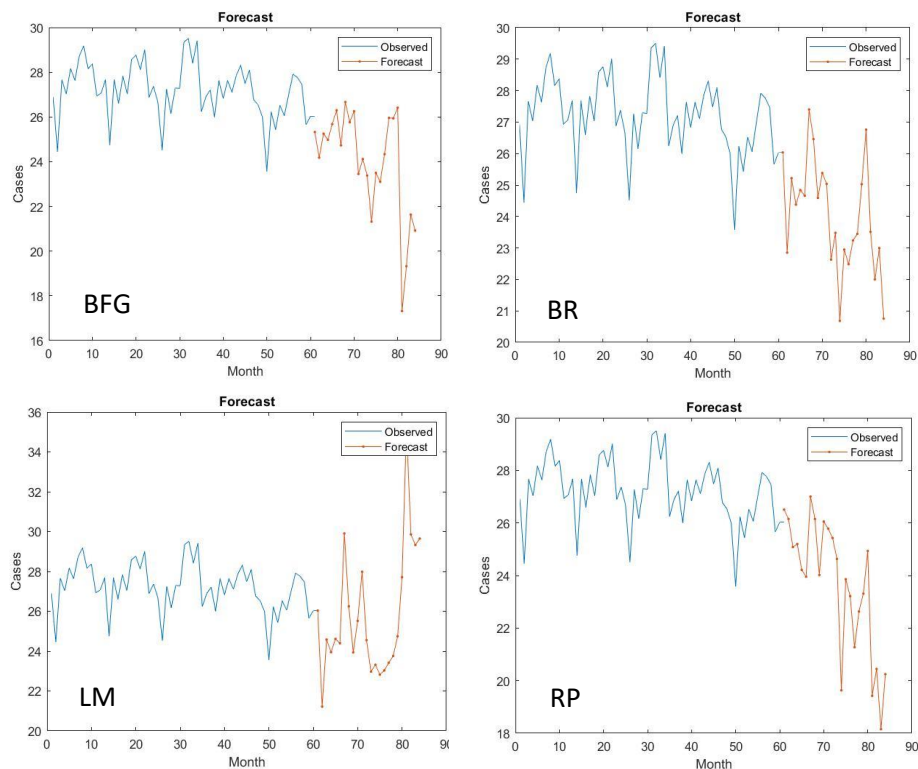
Potwierdzeniem tych zależności są wyniki predykcji uzyskane dla kolejnej sieci neuronowej (rys. 63), gdzie bardzo wyraźnie widać różnice między charakterystykami dla danych rzeczywistych a prognozowanych. Podobnie i w tym przypadku najlepiej wygląda predykcja dla algorytmu BR, a najgorzej dla LM i BFG.

Kolejny rysunek (rys. 64) potwierdza przewagę algorytmu BR nad pozostałymi.

Charakterystyka uzyskana przy zastosowaniu algorytmu LM w tym przypadku wykazuje największą różnicę i jest wynikiem największego błędu walidacji w przypadku sieci z 10-ciomą i 15-toma neuronami w warstwie ukrytej.



Rys. 63 Wykresy predykcji zużycia energii w modelu perceptronu wielowarstwowego jednokierunkowego z jedną warstwą ukrytą i 10-ciomą neuronami przy zastosowaniu czterech algorytmów uczenia, przy zastosowaniu algorytmu BFG, BR, LM i RP



Rys. 64 Wykresy predykcji zużycia energii w modelu perceptronu wielowarstwowego jednokierunkowego z jedną warstwą ukrytą i 15-toma neuronami przy zastosowaniu czterech algorytmów uczenia 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 dała 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.

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 RP wykazały się największą niestabilnością uzyskiwanych wyników.

4.3 Wnioski z uzyskanych wyników

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 urządzeń 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 metod¹³³. Zaskoczeniem są wyniki uzyskane zwłaszcza przez algorytm 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.

¹³³ 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; wejście 16.10.2021

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 wskazuje, 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.

5 Możliwość adaptacji zaproponowanych rozwiązań w Siłach Zbrojnych

Analizując cechy wojskowej infrastruktury lotniczej i systemu zarządzania energią w Siłach Zbrojnych opisanych szczegółowo w rozdziale 2.1 można dostrzec wiele cech wspólnych i różnic między sposobem funkcjonowania cywilnych portów lotniczych i baz lotniczych. Kwestie związane z przepisami ruchu lotniczego i zasadami bezpieczeństwa lotów są podobne. Skład elementów infrastruktury lotniskowej jest również zbliżony najbardziej w bazach lotnictwa transportowego, niemniej jednak dla baz lotnictwa taktycznego brak jest największych konsumentów energii występujących w portach cywilnych, czyli terminali pasażerskich.

Wspomniano również o zasadniczej różnicy wynikającej z celu działalności obiektów lotniskowych, sposobu finansowania i zarządzania lotniskami. Zdefiniowano podstawy działań ukierunkowanych na poprawę efektywności energetycznej baz lotniczych.

Reasumując można stwierdzić, że w przypadku baz lotniczych głównym argumentem przemawiającym za zwiększaniem efektywności energetycznej powinno być w kolejności:

- bezpieczeństwo energetyczne;
- koszty funkcjonowania.

Należy pamiętać, że bazy lotnicze stanowią najbardziej krytyczną infrastrukturę Sił Zbrojnych, ponieważ zabezpieczają 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 i zastosowaniem technologii magazynowania energii, a więc dążenie do budowy modelu wyspowego sieci energetycznej. Powinno to zostać poprzedzone analizą zużycia energii i predykcją jej zapotrzebowania. Takie działania z powodzeniem od lat wdraża wiele państw NATO, a USA pracują nad zastosowaniem do tego celu również technologii bardzo małych modułowych reaktorów zarówno stacjonarnych, jak i mobilnych (vSMR- very Small Modular Reactors).

Drugi aspekt, związany z kosztami jest niemniej ważny. Bazy lotnicze utrzymywane są ze środków publicznych. Wymienione w niniejszej dysertacji technologie oraz sposoby zarządzania systemami energetycznymi obejmujące wszystkie elementy wymienione i opisane w rozdziale 1.2 mogą mieć zastosowanie również w bazach lotniczych Sił Zbrojnych. 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 rozwiązań organizacyjno-technicznych zabezpieczających zasilanie infrastruktury w bazach lotniczych:

- szerokie zastosowanie audytu energetycznego;
- budowę systemu zarządzania energią (mikrosieci), jako narzędzia skonstruowanego w oparciu o 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 ogniów 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.

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 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.

Abstract

Airports are at the top of energy consuming infrastructure. Many analyses have shown that buildings are the biggest consumers of energy around the world. The purpose of this dissertation is to analyze how the energy consumption at the civilian airports can be optimized and implemented at the military air force bases. There are three pillars deeply evaluated at this paper: reduction of demand, energy management, alternative or renewable energy sources. This is supplemented with description of other advanced technologies such as microgrids based on energy management software. Consequently the proposal of model for energy profile at the airport has been developed.

This dissertation identifies similarities and differences between civilian and military installations underlying business themes for civilian and very serious operational security aspects for military air bases.

Second part of this paper is dedicated for development of energy demand prediction model for airports. Based on San Francisco Airport energy consumption data together with operational and meteorological parameters the energy model has been identified. The objective of this study was to validate the predictive ability of Artificial Neural Network using Neural Networks Toolbox Applications from MATLAB. For that purpose the multilayer feedforward network with sigmoidal activation function has been applied. To examine the best architecture of neural networks, the model of two layers was tested with five, ten and fifteen neurons at the hidden layer. Four training algorithms has been chosen to train the network: BFGS Quasi-Newton, Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization, RBP resilient backpropagation. The results were verified by assessment of regression value R and mean-square errors MSE and RMSE.

The study results confirmed that selected feedforward perceptron with sigmoidal activation function for neurons at the hidden layer has a very good regression abilities. Best performance achieved for Bayesian Regularization training algorithm. That solution can be successfully implemented to the energy optimization model at the Polish Air Force Bases.

Załącznik 1 Tabela zagregowanych danych dla portu lotniczego San Francisco

Rok	Mies	Mies_wakacyjny	Mies_kolejny	Energia_B	Ile_pasazerow	Ladunek	Loty	Efekt_energ	Sr_Predk_Wiatru_10m	Gestosc_pow	Temperatura Śr za miesiące w K	Temperatura_C	Cisnienie_kPa	Promieniowanie _mies	Temp_termometru _mokrego	Wilgotnosc_przy_ ziemi
2013	1	0	1	26,906509000	3209356,00	2368915,00	15250,00	8,38377E-06	3,22483871	1,254040352	280,2509677	7,100967742	100,8825806	2,763870968	4,430967742	82,13290323
2013	2	0	2	24,448177000	2968951,00	2142313,00	13879,00	8,23462E-06	3,3225	1,244875931	281,9510714	8,801071429	100,7528571	3,916785714	5,796428571	81,16464286
2013	3	0	3	27,664066000	3599968,00	2451413,00	15902,00	7,68453E-06	3,354193548	1,23103797	284,4487097	11,29870968	100,5154839	4,671290323	7,743225806	80,22354839
2013	4	0	4	27,025544000	3609543,00	2469149,00	15794,00	7,48725E-06	4,187	1,217844397	287,0826667	13,93266667	100,359	6,434	7,807333333	70,33966667
2013	5	0	5	28,171625000	3934899,00	2693743,00	16776,00	7,15943E-06	4,575483871	1,206761061	289,3758065	16,22580645	100,24	7,026129032	8,496774194	66,45645161
2013	6	1	6	27,632082000	4155153,00	2725941,00	16894,00	6,65008E-06	4,452333333	1,194267309	291,6563333	18,50633333	99,984	6,941333333	10,50966667	66,70133333
2013	7	1	7	28,723692000	4181115,00	2796944,00	17233,00	6,86986E-06	4,079354839	1,190269467	292,6129032	19,46290323	99,97612903	6,081290323	11,13806452	67,07419355
2013	8	1	8	29,183370000	4351101,00	2891817,00	18009,00	6,70712E-06	3,89483871	1,191195822	292,7051613	19,55516129	100,0854839	6,339032258	12,49419355	71,55
2013	9	1	9	28,157945000	3785479,00	2676265,00	16796,00	7,43841E-06	3,939333333	1,192811394	291,9383333	18,78833333	99,95866667	5,424333333	11,86633333	69,58666667
2013	10	0	10	28,372075000	3926441,00	2723638,00	17197,00	7,2259E-06	2,868064516	1,211572172	288,1358065	14,98580645	100,2083871	-28,15290323	5,950645161	59,20129032
2013	11	0	11	26,933629000	3470482,00	2504894,00	15921,00	7,76077E-06	2,711	1,226693279	285,2086667	12,05866667	100,4283333	2,928	6,173333333	67,56633333
2013	12	0	12	27,066049000	3814276,00	2582568,00	16511,00	7,09599E-06	3,06516129	1,250417171	280,6864516	7,536451613	100,7474194	2,602580645	2,017096774	66,11
2014	1	0	13	27,673732000	3438136,00	2468668,00	15965,00	8,04905E-06	2,699354839	1,2403273	282,8909677	9,740967742	100,7193548	2,77	4,155483871	65,50322581
2014	2	0	14	24,756445000	3081846,00	2194751,00	13968,00	8,03299E-06	3,479285714	1,229845969	284,2303571	11,08035714	100,3410714	3,098928571	8,170714286	83,39678571
2014	3	0	15	27,666542000	3771574,00	2581588,00	16632,00	7,33554E-06	3,494193548	1,222634506	286,14	12,99	100,4229032	4,616129032	8,661290323	76,67096774
2014	4	0	16	26,605333000	3887382,00	2624540,00	16701,00	6,84402E-06	3,652	1,216261202	287,274	14,124	100,2953333	6,146	8,982666667	75,055
2014	5	0	17	27,824465000	4151403,00	2766745,00	17402,00	6,70242E-06	4,317419355	1,20527567	289,8051613	16,65516129	100,2651613	7,311290323	8,937741935	65,65548387
2014	6	1	18	27,033308000	4327219,00	2818673,00	17287,00	6,24727E-06	4,301333333	1,192047839	291,874	18,724	99,87266667	7,101333333	9,814666667	64,134
2014	7	1	19	28,576218000	4506218,00	2947973,00	18084,00	6,34151E-06	3,806129032	1,18615104	294,0429032	20,89290323	100,1170968	6,60483871	12,04483871	65,31322581
2014	8	1	20	28,763235000	4525926,00	2918144,00	18033,00	6,35522E-06	3,705806452	1,186046133	293,8367742	20,68677419	100,0380645	5,603870968	12,96225806	69,74774194
2014	9	1	21	28,123771000	3919485,00	2685821,00	16891,00	7,17537E-06	3,284666667	1,186276196	293,3126667	20,16266667	99,879	5,093333333	13,35233333	72,01933333
2014	10	0	22	29,002561000	4059884,00	2781740,00	17652,00	7,14369E-06	2,871935484	1,197461699	291,2767742	18,12677419	100,1209677	3,898709677	10,73387097	66,04
2014	11	0	23	26,882098000	3629099,00	2525351,00	15966,00	7,40738E-06	2,623333333	1,222097209	286,5283333	13,37833333	100,515	2,752666667	9,290333333	75,68333333
2014	12	0	24	27,369288000	3856908,00	2625368,00	16141,00	7,09617E-06	3,70516129	1,230192909	284,4796774	11,32967742	100,4574194	1,801935484	9,596774194	87,76064516
2015	1	0	25	26,677871000	3551072,00	2546434,00	15693,00	7,51262E-06	2,358064516	1,241279818	282,8332258	9,683225806	100,776129	2,759032258	8,035806452	85,49806452
2015	2	0	26	24,515679000	3248534,00	2281950,00	13993,00	7,54669E-06	3,279642857	1,225517522	285,3753571	12,22535714	100,3907143	3,478571429	9,923928571	83,45892857
2015	3	0	27	27,263622000	4002732,00	2690735,00	16452,00	6,81125E-06	2,944516129	1,222567976	286,5664516	13,41645161	100,5670968	4,992258065	10,0616129	80,14516129
2015	4	0	28	26,156990000	4022770,00	2725442,00	16100,00	6,50223E-06	4,079333333	1,218266335	286,703	13,553	100,261	6,389333333	7,997333333	72,98233333
2015	5	0	29	27,295273000	4361622,00	2919021,00	16947,00	6,25806E-06	4,210645161	1,211553315	287,7970968	14,64709677	100,0890323	5,767741935	9,111290323	76,61709677
2015	6	1	30	27,275454000	4559640,00	2962975,00	17058,00	5,98193E-06	4,049	1,193721979	291,7146667	18,56466667	99,95833333	6,758333333	11,47666667	70,68233333
2015	7	1	31	29,354198000	4802431,00	3119101,00	17886,00	6,11236E-06	4,149032258	1,185688292	293,97	20,82	100,0532258	6,738387097	12,81903226	68,31483871
2015	8	1	32	29,505047000	4797484,00	3115301,00	18024,00	6,15011E-06	3,897096774	1,185490175	294,0854839	20,93548387	100,0758065	6,426774194	13,08935484	68,61258065
2015	9	1	33	28,402930000	4201882,00	2827789,00	16503,00	6,75957E-06	3,372	1,187605423	293,045	19,895	99,89966667	5,302333333	10,233	60,37166667
2015	10	0	34	29,414733000	4375077,00	2938071,00	17373,00	6,72325E-06	2,818064516	1,1951172	291,8632258	18,71322581	100,126129	4,145806452	12,21	69,51096774

2015	11	0	35	26,235359000	4014388,00	2707581,00	16236,00	6,53533E-06	3,342333333	1,231455854	284,3036667	11,15366667	100,4983333	3,076333333	6,354333333	72,89266667
2015	12	0	36	26,891415000	4129462,00	2832030,00	16392,00	6,51209E-06	3,707419355	1,241201313	282,4129032	9,262903226	100,62	2,118387097	6,319354839	81,49709677
2016	1	0	37	27,209094000	3749417,00	2692060,00	15653,00	7,25689E-06	3,494193548	1,235377732	283,3148387	10,16483871	100,4677419	1,984516129	8,368709677	87,1883871
2016	2	0	38	25,994404000	3543751,00	2546057,00	14898,00	7,33528E-06	3,014827586	1,234066217	284,5003448	11,35034483	100,7810345	3,844827586	9,015862069	81,84586207
2016	3	0	39	27,633975000	4138030,00	2919616,00	16812,00	6,67805E-06	4,243870968	1,224298751	285,5206452	12,37064516	100,3419355	4,272903226	9,859032258	85,53064516
2016	4	0	40	26,832548000	4172707,00	2952664,00	16835,00	6,43049E-06	3,876666667	1,218248032	286,958	13,808	100,3486667	6,177666667	9,923666667	78,90133333
2016	5	0	41	27,631408000	4574399,00	3149751,00	17953,00	6,04045E-06	3,677741935	1,207239365	288,7854839	15,63548387	100,0751613	6,368387097	10,74483871	78,00354839
2016	6	1	42	27,110580000	4922320,00	3231024,00	18207,00	5,50768E-06	4,291	1,197580122	291,346	18,196	100,1546667	7,23	10,567	67,38333333
2016	7	1	43	27,865644000	5169044,00	3400260,00	18968,00	5,39087E-06	4,329354839	1,193551328	292,1651613	19,01516129	100,0983871	6,804193548	10,58419355	66,28645161
2016	8	1	44	28,301314000	5112250,00	3476421,00	19464,00	5,53598E-06	4,002580645	1,193057412	292,0854839	18,93548387	100,0296774	5,811290323	11,2316129	69,56387097
2016	9	1	45	27,481793000	4544856,00	3143130,00	17741,00	6,04679E-06	3,667666667	1,194535522	292,004	18,854	100,1256667	5,275	10,193	63,732
2016	10	0	46	28,091286000	4572106,00	3200353,00	17705,00	6,14406E-06	3,571612903	1,207807595	288,953871	15,80387097	100,1806452	3,624193548	11,01096774	75,67870968
2016	11	0	47	26,769555000	4267820,00	2980757,00	16811,00	6,27242E-06	2,840333333	1,223663375	286,1046667	12,95466667	100,495	2,784333333	10,307	82,66266667
2016	12	0	48	26,538439000	4339805,00	3084930,00	17106,00	6,11512E-06	3,659677419	1,244126439	281,6341935	8,484193548	100,5790323	2,147096774	6,092903226	84,51806452
2017	1	0	49	25,993216000	3893455,00	2874955,00	15987,00	6,67613E-06	4,170967742	1,241918389	281,4164516	8,266451613	100,3229032	2,276774194	6,398709677	87,52064516
2017	2	0	50	23,577983000	3481480,00	2585477,00	14300,00	6,7724E-06	4,224642857	1,230265775	283,6853571	10,53535714	100,1828571	2,896071429	8,7325	87,49142857
2017	3	0	51	26,233041000	4335634,00	3066349,00	17035,00	6,05057E-06	3,464516129	1,229373045	285,1429032	11,99290323	100,6245161	4,794193548	9,52	84,31806452
2017	4	0	52	25,427510000	4426358,00	3029837,00	16438,00	5,74457E-06	3,925	1,222766628	285,984	12,834	100,379	5,756333333	9,575	81,843
2017	5	0	53	26,521468000	469822,00	3296964,00	17829,00	5,64308E-06	4,116451613	1,210799936	287,9241935	14,77419355	100,0709677	6,854193548	10,40225806	78,93129032
2017	6	1	54	26,055427000	5134738,00	3456502,00	18587,00	5,07434E-06	4,309666667	1,198870909	290,5586667	17,40866667	99,99166667	7,361333333	11,59066667	74,79633333
2017	7	1	55	27,001306000	5497819,00	3636333,00	19701,00	4,91128E-06	4,161935484	1,192504401	292,3754839	19,22548387	100,0825806	7,133870968	10,90387097	66,19612903
2017	8	1	56	27,915692000	5518744,00	3717758,00	20280,00	5,05834E-06	3,83483871	1,186338772	293,5151613	20,36516129	99,95322581	5,372580645	12,1183871	67,11225806
2017	9	1	57	27,764684000	4736759,00	3338448,00	18289,00	5,86154E-06	3,412333333	1,184636984	293,8606667	20,71066667	99,92733333	5,155333333	11,745	62,54766667
2017	10	0	58	27,466836000	4869130,00	3400184,00	18725,00	5,64102E-06	3,127096774	1,206007483	289,4774194	16,32741935	100,2125806	4,294193548	6,637419355	55,27806452
2017	11	0	59	25,656358000	4573457,00	3124130,00	17625,00	5,60984E-06	2,835666667	1,222933048	286,0846667	12,93466667	100,428	2,579	9,618	79,85733333
2017	12	0	60	26,028127000	4660693,00	3269484,00	18479,00	5,5846E-06	3,053548387	1,246155266	281,906129	8,756129032	100,8403226	2,504193548	3,890967742	68,98580645
2018	1	0	61	26,034857000	4191545,00	3048673,00	17377,00	6,21128E-06	2,772903226	1,23783424	283,4325806	10,28258065	100,7093548	2,172580645	8,80483871	88,03935484
2018	2	0	62	23,609237000	3882065,00	2730385,00	15675,00	6,08162E-06	3,632857143	1,23864729	282,9932143	9,843214286	100,6192857	-31,77642857	5,491071429	72,18642857
2018	3	0	63	26,017519000	4674961,00	3158526,00	17953,00	5,56529E-06	3,49	1,230514717	284,0774194	10,92741935	100,3416129	4,534516129	7,420322581	78,86354839
2018	4	0	64	25,377231000	4714530,00	3200568,00	17740,00	5,38277E-06	3,812666667	1,221858492	286,3476667	13,19766667	100,432	6,038	8,903333333	79,56666667
2018	5	0	65	26,134168000	5027789,00	3408335,00	18617,00	5,19794E-06	4,433870968	1,209837365	288,4858065	15,33580645	100,1864516	6,486774194	9,852580645	76,86677419
2018	6	1	66	25,689071000	5432268,00	3501752,00	19071,00	4,72898E-06	4,549666667	1,195916576	291,2133333	18,06333333	99,97	7,471	10,42733333	68,61866667
2018	7	1	67	26,849791000	5700075,00	3641615,00	19682,00	4,71043E-06	4,285806452	1,189166778	293,4493548	20,29935484	100,1690323	-25,72354839	11,49612903	65,68677419
2018	8	1	68	26,891633000	5552579,00	3682599,00	19860,00	4,84309E-06	3,89483871	1,193203224	292,2296774	19,07967742	100,0912903	5,814193548	11,38645161	68,9316129
2018	9	1	69	25,948903000	4655093,00	3301310,00	17814,00	5,5743E-06	3,642333333	1,193932281	291,6496667	18,49966667	99,95366667	5,153	10,37233333	66,66866667
2018	10	0	70	26,962023000	4867897,00	3361877,00	18332,00	5,53874E-06	2,934193548	1,202155387	290,2264516	17,07645161	100,1509677	4,130322581	9,56516129	66,1816129
2018	11	0	71	25,761638000	4517529,00	3118530,00	17271,00	5,70259E-06	2,924	1,223766427	285,7693333	12,61933333	100,3856667	-30,48233333	4,470666667	59,20166667
2018	12	0	72	25,943363000	4580901,00	3222321,00	17708,00	5,66338E-06	3,336774194	1,239213607	282,9729032	9,822903226	100,6580645	2,132258065	7,116774194	82,17645161
2019	1	0	73	25,953093000	4161927,00	3048952	16689	6,23584E-06	3,618064516	1,235355479	283,2280645	10,07806452	100,4351613	2,119032258	8,054193548	83,83677419
2019	2	0	74	23,281059000	3755973,00	2689168	14750	6,19841E-06	5,078928571	1,235967749	282,0242857	8,874285714	100,0578571	2,953928571	5,818571429	82,33928571
2019	3	0	75	25,884415000	4602873,00	3185833	17473	5,62353E-06	3,459354839	1,230437608	284,2532258	11,10322581	100,3974194	4,450322581	8,213548387	82,37193548
2019	4	0	76	25,294520000	4697790,00	3224369	17355	5,38434E-06	3,654	1,216690413	287,1096667	13,95966667	100,2733333	5,655666667	10,70033333	83,37033333
2019	5	0	77	26,134921000	5013085,00	3408204	18126	5,21334E-06	4,209032258	1,210889344	287,6245161	14,47451613	99,97419355	5,776774194	10,21580645	82,16645161
2019	6	1	78	26,411896000	5471861,00	3479658	18661	4,82686E-06	4,008333333	1,196384456	291,2353333	18,08533333	100,0166667	7,31	11,39766667	70,70833333
2019	7	1	79	27,269783000	5620160,00	3652895	19658	4,85214E-06	4,522903226	1,192977135	292,2577419	19,10774194	100,0819355	6,91483871	71,55032258	82,37193548
2019	8	1	80	28,151566000	5750758,00	3871107	20809	4,89528E-06	4,040967742	1,184401818	294,1574194	21,00741935	100,0083871	6,503225806	12,71774194	67,08677419
2019	9	1	81	1,000000000	1,00	3154101	16361	1	3,938666667	1,189002511	293,0493333	19,89933333	100,0186667	-27,695	11,92866667	66,09766667
2019	10	0	82	1,000000000	1,00	3343832	18040	1	3,257741935	1,207993796	289,0609677	15,91096774	100,2332258	4,565806452	4,724516129	51,7916129
2019	11	0	83	1,000000000	1,00	3094114	16823	1	2,674	1,221583204	285,627	12,477	100,1566667	2,631333333	6,452666667	68,01366667
2019	12	0	84	1,000000000	1,00	3219602	17453	1	3,558387097	1,234489647	283,2774194	10,12741935	100,3822581	1,769032258	8,633548387	88,45806452

Załącznik 2 Linia komend wykorzystana w badaniu sieci neuronowej z wykorzystaniem MATLAB

```
% Automate Importing Data by Generating Code Using the Excel xlsx file
% This code reproduces the data obtained using the Excel xlsx file Energia_dane_20210811
% by connecting to this file, executing a data matrix, and importing data into the
% MATLAB(R) workspace.
% Auto-generated by MATLAB R2020b and Database Toolbox from PCSS virtual machine on
server:
% eagle.man.poznan.pl project:
% Estymacja zużycia energii w bazach lotniczych oraz analiza wibroakustyczna silników
lotniczych
% command line used via opensource software MobaXterm_Personal_21.3
% Komendy serwery PCSS
% srun --x11 -n 4 --time=1:00:00 --partition=altair -A 473 --pty /bin/bash
% module av matlab
% module load matlab/R2020b
% matlab
%% Tworzenie macierzy danych wejściowych i wyjściowych z macierzy data

data = readtable('Dane_SFA_20211023.xlsx','ReadVariableNames',true);

%X_data = [data.Rok data.Mies data.Mies_wakacyjny data.Mies_kolejny data.Loty
data.Sr_Predk_Wiatru_10m data.Gestosc_pow data.Temperatura_C data.Cisnienie_kPa
data.Promieniowanie_mies data.Temp_termometru_mokrego data.Wilgotnosc_przy_ziemi];
X_data = [data.Rok data.Mies data.Mies_kolejny data.Ile_pasazerow data.Ladunek data.Loty
data.Sr_Predk_Wiatru_10m data.Gestosc_pow data.Temperatura_C data.Cisnienie_kPa
data.Promieniowanie_mies data.Temp_termometru_mokrego data.Wilgotnosc_przy_ziemi];
T_data = [data.Energia_B];
Czas_data=[data.Mies_kolejny];
```

```

X = X_data'; %Macierz danych wejściowych transponowana - input
T = T_data'; %Macierz danych wyjściowych - target (do odzwierciedlenia tych danych
trenujemy naszą sieć)
Cz = Czas_data';%Macierz czasu w miesiącach
X=X(:,1:61);
T=T(:,1:61);
Cz=Cz(:,1:61);
size(X);
size(T);
%setdemorandstream(491218382);
%%Standaryzacja danych wejściowych
mu = mean(X);
sig = std(X);
%% Tworzenie sieci neuronowej
net = fitnet(15,'trainbr'); %nazwy sieci FIT-15-trainbr
%'trainbr' - Funkcja wg. której przeprowadzono trening sieci - Bayesian Regularization
%'trainlm'- Levenberg-Marquardt;
%'trainbfg' - BFGS Quasi-Newton;
%'trainrp' - Resilient Backpropagation;

%możemy użyć innej sieci w tym miejscu np.
%net = narxnet(1:2,20); %nieliniowa autoregresywna sieć neuronowa z wejściem zewnętrznym
%możliwe argumenty sieci: narxnet(inputDelays,feedbackDelays,hiddenSizes,trainFcn)
[net,tr] = train(net,X,T);
view(net);

nntraintool;
%nntraintool('close');
figure;
plotperform(tr);

```

```

%% Testowanie sieci neuronowej
%testX = X(:,tr.testInd);
%testT = T(:,tr.testInd);
%tr.testInd - Ta struktura zawiera wszystkie informacje dotyczące uczenia sieci.
%Na przykład tr.trainInd, tr.valInd i tr.testInd zawierają indeksy punktów danych,
%które były używane odpowiednio w zestawach uczących, walidacyjnych i testowych.
%Jeśli chcesz przekwalifikować sieć przy użyciu tego samego podziału danych,
%możesz ustawić net.divideFcn na „divideInd”, net.divideParam.trainInd na tr.trainInd,
net.divideParam.valInd na tr.valInd, net.divideParam.testInd to tr.testInd.
%Struktura tr śledzi również kilka zmiennych podczas treningu, takich jak
%wartość funkcji wydajności, wielkość gradientu itp. Możesz użyć rekordu
%szkolenia do wykreślenia postępu wydajności za pomocą polecenia c.

%testY = net(testX);
%perf = mse(net,testT,testY);

%mse - Ta funkcja ma dwa opcjonalne parametry, które są powiązane z sieciami:
%'regularization' można ustawić na dowolną wartość z zakresu od 0 do 1.
%Im większa wartość 'regularization', tym więcej kwadratowych wag i odchyleń
%uwzględnianych jest w obliczeniach wydajności w odniesieniu do błędów.
%Wartością domyślną jest 0, co oznacza brak regularyzacji.
%'normalization' można ustawić na 'none' (ustawienie domyślne); 'standard', który
normalizuje
%błędy w zakresie od -2 do 2, odpowiadając normalizacji wyników i celów między -1 a 1;
%i 'percent', który normalizuje błędy między -1 a 1. Ta funkcja jest przydatna w sieciach
z wieloelementowymi wyjściami.
%Zapewnia, że uwzględnia dokładność elementów wyjściowych o różnych zakresach wartości
docelowej jest traktowana jako równie ważna,
%zamiast priorytetyzowania względnej dokładności elementu wyjściowego o największym
zakresie wartości docelowej.

```



```

%Możesz utworzyć standardową sieć, która używa mse z feedforwardnet lub
cascadeforwardnet.
%Aby przygotować niestandardową sieć do trenowania za pomocą mse, ustaw net.performFcn na
„mse”.
%Spowoduje to automatyczne ustawienie net.performParam na strukturę z domyślnymi
opcjonalnymi wartościami parametrów.
Y = net(X);
figure;
plotregression(T,Y);
e = T - Y;
figure;
ploterrhist(e);

%% Obliczanie błędu sieci
perf = perform(net,T,Y)
rmse=sqrt((sum((Y-T).^2))/61)
figure
subplot(2,1,1)
plot(T)
hold on
plot(Y,'.-')
hold off
legend(["Observed" "Forecast"])
ylabel("Cases")
title("Forecast")

subplot(2,1,2)
stem(Y - T)
xlabel("Month")
ylabel("Error")

```

```
title("RMSE = "+rmse)

%Predykcja wartości
Xkr=X_data(61:84,:);
Xkr=Xkr';
Y = net(Xkr);
figure
plot(T)
hold on
idx2=(61:84);
plot(idx2,Y,'.-')
hold off
xlabel("Month")
ylabel("Cases")
title("Forecast")
legend(["Observed" "Forecast"])
```

Bibliografia według kolejności cytowania.

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, Szypra 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/zarzdzenie-energi-praktyczne-aspekty-obnienienia-kosztow-funkcjonowania-przedsibiorstwa>
12. T.Hikmet Karakoc; C.Ozgun 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. *Landscape 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 of 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”. *elkro.info* 6/2014; <https://www.elekro.info.pl/artykul/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 ogniw 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>
61. Małek A. Wendeker M. Ogniw 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-heat-and-power-generation/>
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.afceec.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.suppl1.6>
83. Ziemianek Stanisław, Metody śledzenia 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 genetyczne 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-

