

NAUKA DLA OBRONNOŚCI

Bezpieczeństwo Infrastruktury Krytycznej

TOM 2

pod redakcją: **MICHAŁA CIAŁKOWSKIEGO
TOMASZA ŁODYGOWSKIEGO
ANDRZEJA ŻYLUKA**



WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH

WARSZAWA 2022

RECENZENCI

gen. dyw. (rez.) dr hab. inż. pil. Leszek CWOJDZIŃSKI

gen. dyw. dr inż. Dariusz ŁUKOWSKI

plk. dr inż. Wojciech PROKOPOWICZ

prof. dr hab. inż. Andrzej FRĄCKOWIAK

dr hab. inż. Agnieszka WRÓBLEWSKA, prof. PP

dr n. med. Przemysław DAROSZEWSKI

dr inż. Łukasz BRODZIK

dr inż. Łukasz GIERZ

dr inż. Przemysław GRZYMISŁAWSKI

dr inż. Radosław JANKOWSKI

dr inż. Robert KŁOSOWIAK

dr inż. Łukasz SEMKŁO

KOMITET REDAKCYJNY

Michał CIAŁKOWSKI – przewodniczący

Tomasz ŁODYGOWSKI

Andrzej ŻYLUK

PRZYGOTOWANIE DO DRUKU

Łukasz SEMKŁO

PROJEKT OKŁADKI

Tomasz GROCHOWSKI

Fot. na okładce: Mika Baumeister, Antonin Duallia, Lance Asper - unsplash.com

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych, w tym nie może być umieszczany ani rozpowszechniany w Internecie bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

© Copyright by Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, wyd. I, 2022 r.

ISBN 978-83-61021-38-4 (oprawa miękka)

ISBN 978-83-61021-39-1 (PDF)

WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH

01-494 Warszawa 46, ul. Księcia Bolesława 6

Drukowano w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych

KOMITET STERUJĄCY

prof. Tomasz ŁODYGOWSKI

Przewodniczący, Politechnika Poznańska

prof. Michał CIAŁKOWSKI

Politechnika Poznańska

KOMITET HONOROWY

prof. Abdelhakim ARTIBA

President of Université Polytechnique Hauts-de-France

nadbryg. Andrzej BARTKOWIAK

Komendant Główny Państwowej Straży Pożarnej

prof. Philippe DUBOIS

Rector of University of Mons

prof. Gesine GRANDE

President of Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg

Jacek JAŚKOWIAK

Prezydent miasta Poznania

prof. Mirosław KOWALSKI

Dyrektor Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych

dr Jari KUUSISTO

Rector of University of Vaasa

nadinsp. Piotr MAKA

Komendant Wojewódzki Policji w Poznaniu

prof. Ángel PAZOS

Rector of University of Cantabria

prof. Francesco PRIOLO

Rector of University of Catania

Leszek WALCZAK

Wojskowe Zakłady Lotnicze nr 2 w Bydgoszczy

Marek WOŹNIAK

Marszałek Województwa Wielkopolskiego

prof. Mykhailo ZGUROVSKY

Rektor Politechniki Kijowskiej

Michał ZIELIŃSKI

Wojewoda Wielkopolski

KOMITET NAUKOWY

prof. Teofil JESIONOWSKI,

Przewodniczący, Rektor Politechniki Poznańskiej

gen. bryg. pil. dr Krzysztof CUR

Rektor-komendant Lotniczej Akademii Wojskowej

dr Przemysław DAROSZEWSKI

Dyrektor Szpitala Ortopedyczno-Rehabilitacyjnego im. W. Degi UM w Poznaniu

gen. bryg. Jan DZIEDZIC

nadbryg. prof. Mariusz FELTYNOWSKI
Rektor-Komendant Szkoły Głównej Służby Pożarniczej

prof. Andrzej FRĄCKOWIAK
Politechnika Poznańska

prof. Marek IDZIOR
Politechnika Poznańska

prof. Stanisław KACHEL
Wojskowa Akademia Techniczna

prof. Zbigniew KORUBA
Rektor Politechniki Świętokrzyskiej

gen. bryg. dr Robert KOSOWSKI
Rektor-Komendant Akademii Sztuki Wojennej

prof. Piotr KOSZELNIK
Rektor Politechniki Rzeszowskiej

prof. Jerzy LIS
Rektor Akademii Górniczo-Hutniczej

gen. dyw. Dariusz ŁUKOWSKI
Biuro Bezpieczeństwa Narodowego

prof. Arkadiusz MEŻYK
Rektor Politechniki Śląskiej

gen. broni pil. dr Tadeusz MIKUTEL
I Zastępca Szefa Sztabu Generalnego

prof. Zbigniew NADOLNY
Politechnika Poznańska

gen. bryg. pil. Ireneusz NOWAK
zastępca Inspektora Sił Powietrznych

prof. Aleksander OLEJNIK
Wojskowa Akademia Techniczna

prof. Piotr SIELICKI
Politechnika Poznańska

gen. bryg. prof. Dariusz SKORUPKA
rektor senior Akademii Wojsk Lądowych

konradm. prof. Tomasz SZUBRYCHT
Rektor-Komendant Akademii Marynarki Wojennej

prof. Franciszek TOMASZEWSKI
Politechnika Poznańska

plk prof. Przemysław WACHULAK
Rektor-Komendant Wojskowej Akademii Technicznej

prof. kpt. ż. w. Adam WEINTRIT
Rektor Uniwersytetu Morskiego w Gdyni

Elżbieta WAWRZYNKIEWICZ
Wojskowe Zakłady Motoryzacyjne

prof. Krzysztof WILDE
Rektor Politechniki Gdańskiej

prof. Arkadiusz WÓJS

Rektor Politechniki Wrocławskiej

prof. Krzysztof ZAREMBA

Rektor Politechniki Warszawskiej

prof. Andrzej ŻYLUK

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

KOMITET ORGANIZACYJNY

prof. Michał CIAŁKOWSKI

Przewodniczący

prof. Agnieszka WRÓBLEWSKA

V-ce przewodnicząca

mgr Paulina SIELICKA

Sekretarz

gen. dyw. pil. dr Leszek CWOJDZIŃSKI

plk dr Wojciech PROKOPOWICZ

pplk dr Mariusz WESOŁOWSKI

dr Łukasz SEMKŁO

mgr Natalia LEWANDOWSKA

mgr Aleksandra ROSIŃSKA

SŁOWO WSTĘPNE

Infrastruktura krytyczna obejmuje podstawowe elementy mające znaczenie dla utrzymania niezbędnych funkcji społecznych, a więc zdrowia i bezpieczeństwa obywateli oraz dobrobytu materialnego, kulturowego i społecznego ludności państwa. Infrastruktura krytyczna zawiera w sobie systemy i zasoby fizyczne lub wirtualne, których naruszenie miałoby wpływ na bezpieczeństwo w skali lokalnej lub globalnej. Zabezpieczenie tych struktur na okoliczność sytuacji nadzwyczajnych musi być troską odpowiednich służb dozorujących wybrane elementy na poziomie lokalnym oraz globalnym całego państwa.

Budowa Systemu Ochrony Infrastruktury stanowi płaszczyznę do integracji działań zmierzających do polepszenia odporności infrastruktury krytycznej, jak również jej strategicznych zasobów.

Celem konferencji jest przedstawienie różnych aspektów (prawnych, technicznych, administracyjnych, osobowych) ochrony infrastruktury krytycznej. Ważnym efektem konferencji będzie wymiana doświadczeń pomiędzy osobami i jednostkami odpowiedzialnymi za ochronę infrastruktury krytycznej, co przyczyni się do jej usprawnienia i unowocześnienia.

Spotkanie to umożliwi merytoryczną dyskusję, która pozwoli dokonać przeglądu istniejących rozwiązań i procedur oraz wypracować opinie na temat potrzeb i działań, na jakie powinniśmy już dziś być przygotowani. Liczymy na to, że prezentacje ekspertów oraz dyskusje przyczynią się do lepszego rozumienia złożoności problemów ochrony infrastruktury i poprawienia wszelkich procedur służących jej bezpieczeństwu na okoliczność sytuacji nadzwyczajnych.

Tomasz Łodygowski
Michał Ciałkowski

SPIS TREŚCI

<i>Robert KŁOSOWIAK</i> Analiza numeryczna sprawności termicznej mieszalnika spalin silnika turboodrzutowego.....	1
<i>Zbigniew KORUBA</i> Sterowanie zestawem artyleryjsko-rakietowym w warunkach oddziaływania zakłóceń losowych	11
<i>Natalia LEWANDOWSKA</i> Analityczne wyznaczenie funkcji pulsacji ciśnienia w tętnicy	31
<i>Natalia LEWANDOWSKA, Przemysław GRZYMISŁAWSKI</i> Wykorzystanie technologii uczenia maszynowego w procesie wytwarzania i wykorzystania energii.....	41
<i>Andrzej LIS, Robert RECZKOWSKI, Mirosław WNOROWSKI</i> Zrozumieć strategiczne uwarunkowania funkcjonowania i rozwoju infrastruktury krytycznej: analiza strategiczna, konektografia, wargaming.....	53
<i>Tomasz ŁODYGOWSKI</i> Struktura delikatna – człowiek	73
<i>Jędrzej ŁUKASIEWICZ, Anna KOBASZYŃSKA-TWARDOWSKA</i> Analiza sekwencji zdarzeń w czasie ataku na obiekt infrastruktury krytycznej prowadzonego za pomocą bezzałogowego statku powietrznego	81
<i>Dariusz ŁUKOWSKI</i> Energetyka rozproszona jako element budowy odporności i bezpieczeństwa energetycznego infrastruktury krytycznej	97
<i>Marta MACIEJEWSKA, Jakub BŁAŻEJÓW, Marta GALANT-GOŁĘBIEWSKA, Barbara MIKA</i> Wpływ deficytu snu na stan psychofizyczny pilota w trakcie lotu symulowanego	109
<i>Tadeusz MIKUTEL</i> Pozahoryzontalne systemy radiolokacyjne wczesnego ostrzegania w ochronie infrastruktury krytycznej	121
<i>Mateusz NOWAK, Przemysław PIEKARCZYK</i> Urządzenia stosowane do kontroli bezpieczeństwa w portach lotniczych.....	155
<i>Aleksander OLEJNIK, Andrzej FRYDRCHEWICZ, Michał CIAŁKOWSKI, Łukasz KISZKOWIAK, Adam DZIUBIŃSKI</i> Bojowy Bezzałogowy Samolot Pola Walki.....	165
<i>Aleksandra RAKOWSKA</i> Elektroenergetyka i jej rola w infrastrukturze krytycznej	177

<i>Aleksandra ROSIŃSKA, Sebastian CHWALIBOGOWSKI</i> Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej na przykładzie przedsiębiorstwa gazowego.....	197
<i>Aleksandra ROSIŃSKA, Bartosz ZIEGLER, Michał CIAŁKOWSKI, Jolanta TOMASZEWSKA, Andrzej FRĄCKOWIAK, Krzysztof LEWANDOWSKI</i> Minimalizacja strat energii w kanale o zmiennym przekroju w procesie przetwarzania tworzyw sztucznych.....	209
<i>Lukasz SEMKŁO, Agnieszka WRÓBLEWSKA</i> Analiza współczynnika tarcia dla drogi startowej oraz kołowania	223
<i>Lukasz SEMKŁO</i> Zagrożenia i normy związane z wodorem.....	237
<i>Piotr W. SIELICKI</i> Wybrane założenia projektowania infrastruktury krytycznej podczas obciążeń wybuchowych.....	245
<i>Rafał ŚLEFARSKI, Paweł CZYŻEWSKI, Rafał GORAJ</i> Ogniwa paliwowe w systemach zasilania awaryjnego obiektów infrastruktury krytycznej	259
<i>Aleksandra STANEK-KLEPUSZEWSKA</i> Postawa ciała i zaburzenia postawy u pilotów wojskowych	269
<i>Sławomir STEPIEŃ, Mariusz WESOŁOWSKI, Agnieszka WRÓBLEWSKA</i> Optymalny system pozycjonowania i stabilizacji dronów w zastosowaniach militarnych.....	277
<i>Mariusz Z. WESOŁOWSKI, Marek ADAMOWICZ, Mariusz WESOŁOWSKI</i> Eksploatacja linowych urządzeń awaryjnego hamowania samolotów w Siłach Zbrojnych RP.....	291
<i>Natalia WIŚNIEWSKA, Tomasz KRAKOWSKI</i> Wstępna analiza aktywnego aerodynamicznego sterowania prędkości rotacji dla raket poddźwiękowych.....	305
<i>Piotr ZACHOLSKI, Tomasz KRAKOWSKI</i> Dwustopniowy system odzysku rakiet sondażowych o napędzie hybrydowym.....	321
<i>Joanna ZEMBRZUSKA, Paweł RYCHLEWSKI, Elham KAMGAR</i> Źródła i konsekwencje obecności antybiotyków w środowisku	335
<i>Michael ZGUROVSKY</i> Ensuring energy independence as a new global challenge for European security	349

Robert KŁOSOWIAK*

ANALIZA NUMERYCZNA SPRAWNOŚCI TERMICZNEJ MIESZALNIKA SPALIN SILNIKA TURBOODRZUTOWEGO

W artykule zamieszczono informacje o stosowanych w przemyśle lotniczym mieszalnikach spalin, ich funkcji oraz sposobie modelowania. Głównym celem pracy jest zaprojektowanie, budowa modelu 3D mieszalnika spalin oraz analiza CFD. W celu określenia wpływu zastosowania mieszalnika spalin do analizy przyjęto turbodrzutowy silnik dwuprzepływowy z mieszalnikiem spalin oraz bez mieszalnika spalin. Rezultaty przedstawiono w postaci rozkładów wielkości charakterystycznych dla przepływu. Do projektu zostało wykorzystane oprogramowanie Autodesk Inventor Professional, ANSYS ICEM CFD, Fluent, CFD-Post.

Słowa kluczowe: turbinowy silnik lotniczy, mieszalnik spalin, turbulencja, mechanika płynów.

1. WPROWADZENIE

Potrzebę stosowania mieszalników spalin w turbodrzutowych silnikach lotniczych możemy podzielić ze względu na rodzaj pełnionej funkcji. Możemy wyróżnić konstrukcje silników typowe dla rozwiązań militarnych oraz konstrukcje silników charakterystyczne dla transportu mienia czy osób. W każdym z tych przypadków mniej lub bardziej istotny jest hałas.

Z punktu widzenia samolotów transportowych, a w szczególności pasażerskich transkontynentalnych bardzo ważny jest komfort podróży pasażerów jak i załogi samolotu. Hałas jest to bardzo uciążliwy szczególnie na długich trasach. Hałas może powodować np. zdenerwowanie, bóle głowy, a u pilotów może wpływać na ich koncentrację, co jest dużym zagrożeniem dla bezpieczeństwa lotu. Hałas w silnikach lotniczych jest generowany w dużym stopniu przez spaliny wypływające z dyszy wylotowej silnika.

* Politechnika Poznańska, pl. Marii Skłodowskiej Curie 5, 60-965 Poznań

W przypadku turbinowych samolotów bojowych, poza hałasem, bardzo ważna jest temperatura gazów wylotowych, ponieważ umożliwia ona stosowania systemów obronnych naprowadzanych termicznie. W dzisiejszym lotnictwie kładzie się duży nacisk na obniżenie temperatury gazów wylotowych z silnika. Jest to ważna kwestia w lotnictwie wojskowym, a jednym z ważniejszych wymagań konstrukcyjnych jest, aby samolot zostawiał jak najmniejszy ślad cieplny [A. Kozakiewicz,2010], [Kiser, J.,2015].

Hałas towarzyszący przelotowi samolotu bierze się głównie z tarcia rozgrzanych cząsteczek powietrza wylatujących z silnika lotniczego o dużo chłodniejsze cząsteczki powietrza w atmosferze. Im różnica temperatur jest większa, tym wyższy jest poziom hałasu. Jednym ze sposobów ograniczenia hałasu jest zastosowanie mieszalnika spalin w dyszy wylotowej [W. Balicki,2010].

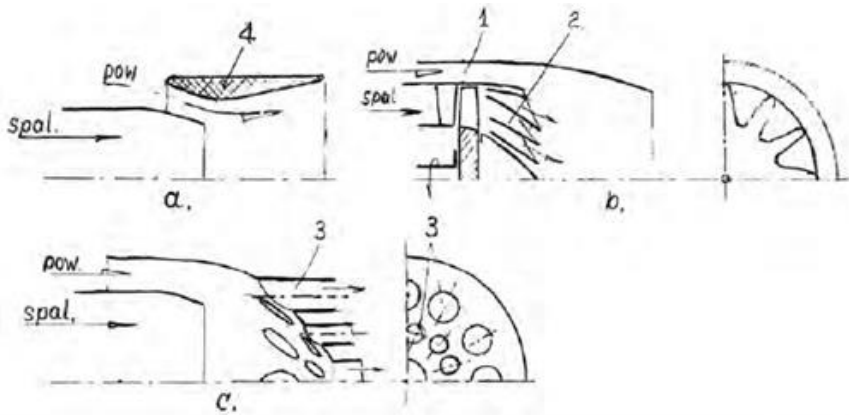
Mieszalnik spalin swoją skuteczność zawdzięcza odpowiedniemu kształtowi [Y. Shan, J. Zhang, 2009]. Odpowiedni kształt powoduje, że zaraz za krawędzią mieszalnika tworzą się zawirowania chłodnego i gorącego powietrza, dzięki czemu strumienie mieszają się ze sobą w efektywny sposób [Povinelli, Louis,1980].

Głównym czynnikiem powodujących potrzebę stosowania mieszalników spalin w turbinowych silnikach odrzutowych jest ograniczenie emisji hałasu.

2. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ

Hałas towarzyszący przelotowi samolotu bierze się głównie z tarcia rozgrzanych cząsteczek powietrza wylatujących z silnika lotniczego o dużo chłodniejsze cząsteczki powietrza w atmosferze. Im różnica temperatur jest większa, tym wyższy jest poziom hałasu. Jednym ze sposobów ograniczenia hałasu jest zastosowanie mieszalnika spalin w dyszy wylotowej.

W silnikach dwuprzepływowych część powietrza z wentylatora nie jest dostarczana do komory spalania, a jest przekazywana kanałem zewnętrznym prosto do dyszy wylotowej. Dzięki mieszalnikowi spalin powietrze z kanałów zewnętrznego i wewnętrznego miesza się w dyszy i wylatuje do atmosfery w tej samej temperaturze, co końcowo daje efekt znacznego obniżenia temperatury spalin. Przykłady rozwiązań przedstawiono na rysunku 1.

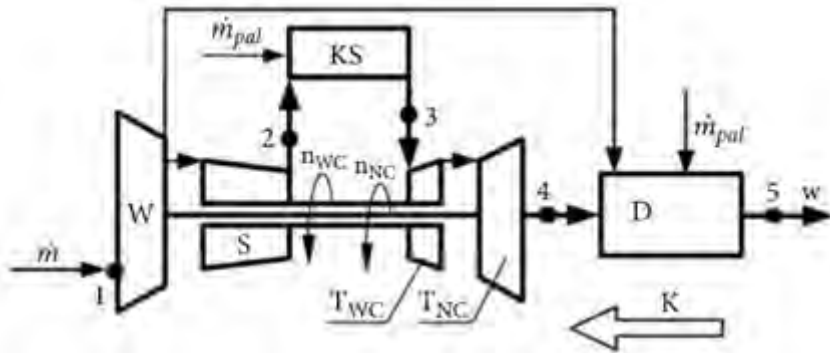


Rys. 1. Metody redukcji hałasu w silniku odrzutowych [5]

W samolotach wojskowych wykorzystuje się to też do pomocy dopalaczom. Dzięki temu, że powietrze z kanału zewnętrznego nie bierze udziału w reakcji chemicznej zachodzącej w komorze spalania, jest bogatsze w tlen, który jest potrzebny do spalania dodatkowej ilości paliwa w dopalaczu. To pozwala na całkowite spalanie mieszanki paliwowej. W samolotach bojowych mieszalnik spalin odgrywa rolę również dopalacza. Analizę termo gazodynamiczną przeprowadzono na silniku RD-33 (rys.2 i 3),

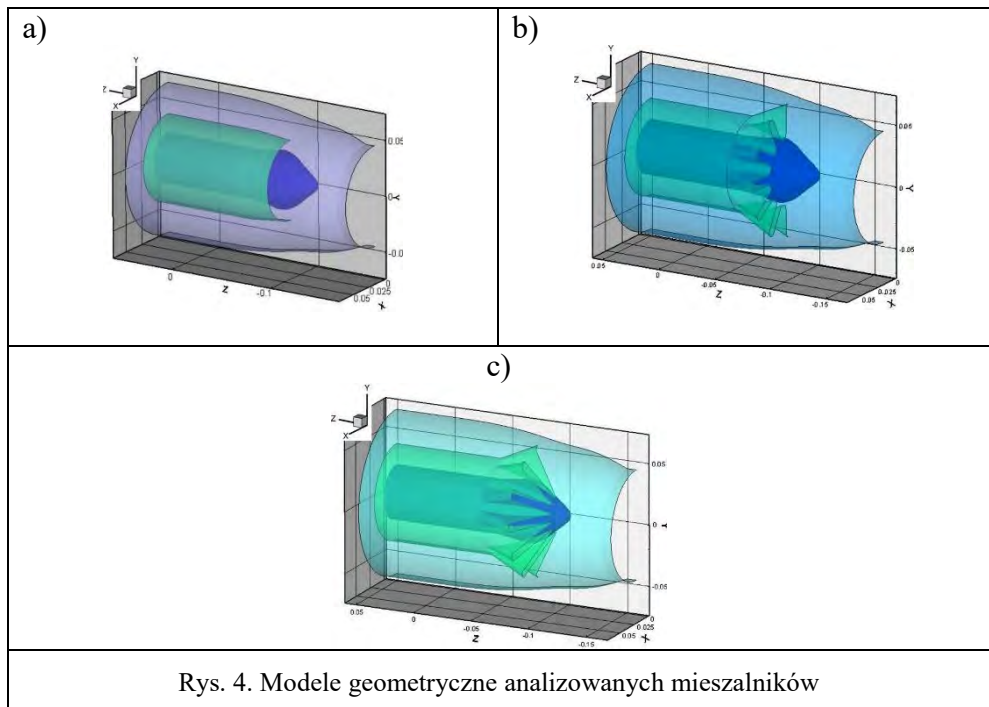


Rys. 2. Zdjęcie silnika odrzutowego RD-33[A. Kozakiewicz,2010]



Rys. 3. Schemat silnika z mieszalnikiem spalin i dopalaczem [A. Kozakiewicz, 2010]

Mieszalnik spalin swoją skuteczność zawdzięcza odpowiedniemu kształtowi. Odpowiedni kształt powoduje, że zaraz za krawędzią mieszalnika tworzą się zawirowania chłodnego i gorącego powietrza, dzięki czemu te dwa strumienie mieszają się ze sobą w efektywny sposób. W publikacji [Y. Shan, J. Zhang, 2009] porównuje wyniki przepływu powietrza uzyskane za pomocą metody numerycznej dla dyszy prostej Rys. 4a (Fig.4a) oraz dwóch dysz z różnymi mieszalnikami spalin Rys. 4b, 4c (Fig.4b, 4c).



Rys. 4. Modele geometryczne analizowanych mieszalników

Z uzyskanych danych Rys. 5 (Fig.5) wynika, że dzięki mieszalnikowi spalin można uzyskać dużo większy współczynnik mieszania się strumieni powietrza. Jest to bardzo duża wartość, więc niepodważalnie ukazuje jak przydatny jest mieszalnik spalin. Sprawność termiczną zdefiniowano jako (1):

$$\eta = \frac{\int T^{0,5} dm - T_p^{0,5} m_p - T_s^{0,5} m_s}{T_{mix}^{0,5} (m_p + m_s) - T_p^{0,5} m_p - T_s^{0,5} m_s} \quad (1)$$

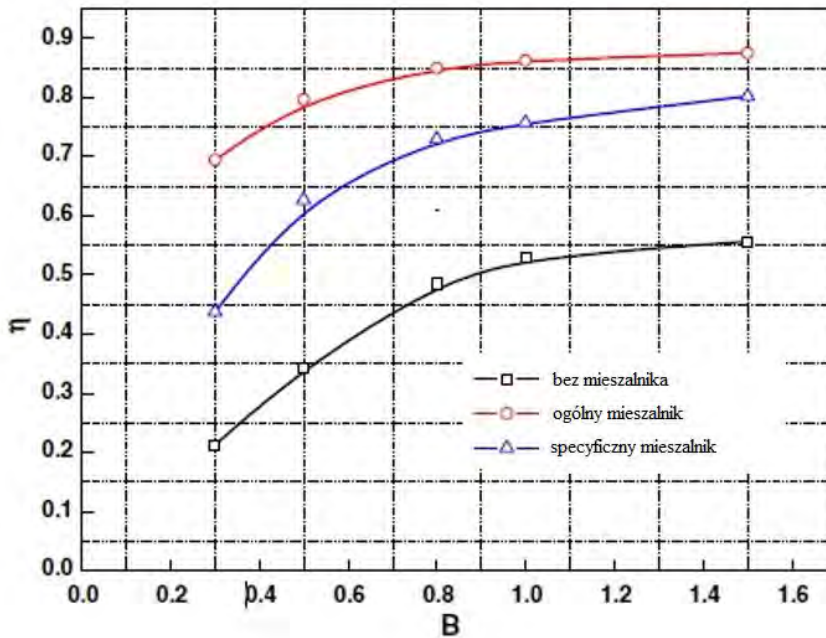
gdzie:

η – sprawność termiczna mieszalnika,

T – temperatura statyczna,

T_{mix} – temperatura strumienia w pełni rozwiniętego,

m_s, m_p – strumień masy przepływający konturem silnika i strumień masy spalin.



Rys. 5. Wyniki analizy numerycznej. Sprawność termiczna η od współczynnika dwuprzepływowości silnika odrzutowego B

3. MODEL MATEMATYCZNY

Symulacja została przeprowadzona za pomocą programu Fluent. Przepływ był turbulentny z natury nieustalony. Z tego powodu najczęstszym podejściem inżynierskim jest rozwiązywanie uśrednionych w czasie równań Naviera- Stokes's „(tak zwanych równań RANS – Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Z uwagi na to, że równania Naviera-Stokesa nie są liniowe, każdy kolejny proces uśredniania generuje dodatkowe niewiadome, które w jakiś sposób trzeba powiązać z wielkościami średnimi. Dlatego pojawia się modelowanie turbulencji, a jedną z propozycji takiego modelu jest wprowadzenie zmiennych: k – kinetycznej energii turbulencji oraz ε – dyssypacji energii. Zmienne te składają się na tak zwaną lepkość turbulentną, która ma za zadanie modelować pozorne zwiększenie lepkości. Mój model uwzględnił równanie energii, a przepływ wykorzystuje model k-epsilon. Wartości tych dwóch zmiennych

k – energia kinetyczna turbulencji wynosi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_x k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c_y k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho c_z k)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_T \Phi - \rho \varepsilon + \frac{c_4 \beta \mu_t}{\sigma_t} \left(g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

ε – Prędkość dyssypacji energii:

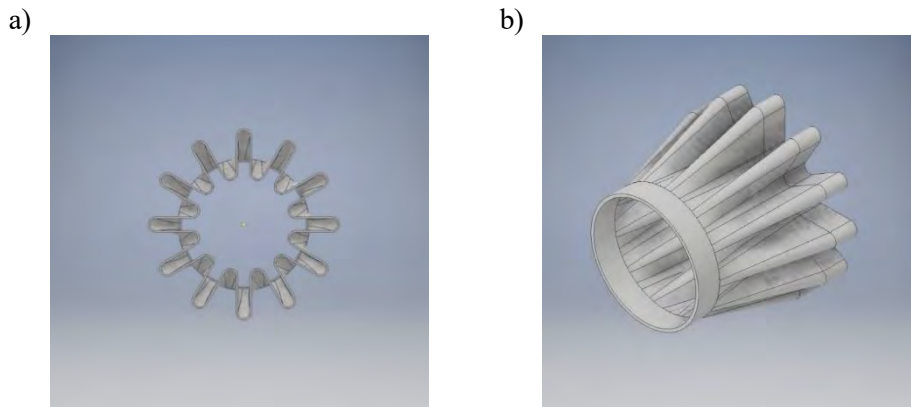
$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_x \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c_y \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho c_z \varepsilon)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \mu_T \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_{2\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{C_\mu(1-C_3)\beta\rho k}{\sigma_t} \left(g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Symulacje wykorzystywały wartości powietrza jako gazu doskonałego. Warunki brzegowe bazują na parametrach panujących w silniku podczas lotu na wysokości przelotowej. Przed uruchomieniem symulacji wykonana została inicjalizacja hybrydowa. Dla obu modeli, z mieszalnikiem oraz bez, zostały wykorzystane dokładnie takie same parametry.

4. MODEL GEOMETRYCZNY

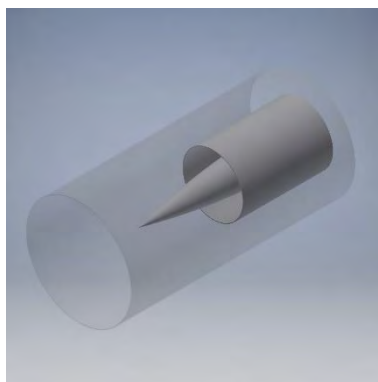
Na podstawie analizy literatury tematycznej zaprojektowałem mieszalnik spalin w programie Autodesk Inventor Professional 2019. Jest on symetryczny, posiada dwaście płatów i ma proste zakończenie. Główną cechą mieszalnika jest napływająca

masa powietrza łagodnie przepływa przez zamodelowane kanały mieszalnika w sposób umożliwiający intensyfikację mieszania Rys. 6(Fig.6).



Rys. 6. Widok zaprojektowanego mieszalnika spalin

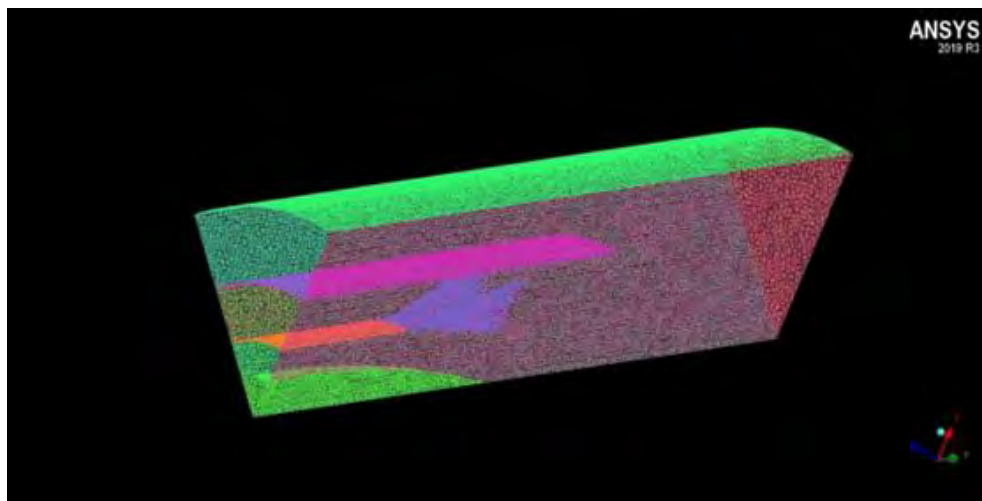
Zaprojektowano również wylot spalin z silnika TSO bez mieszalnika przedstawiony na Rys.7 (Fig. 7). Model powstał w celu porównania rezultatów dla układu z mieszalnikiem i bez mieszalnika spalin.



Rys. 7. Model rury wylotowej spalin bez mieszalnika

Następnie zostały wgrane do programu ICEM CFD, gdzie modele zostały zmniejszone do wycinka 1/8 części całej geometrii poprzez płaszczyzny symetrii. Kolejno dodane zostały elementy takie jak wlot kanału wewnętrznego, wlot kanału zewnętrznego, wlot powietrza otaczającego, wylot całego układu, dwie ściany symetrii oraz ściana „far field”. Kolejnym krokiem było stworzenie siatki Rys. 8(Fig.8) dla wcześniej wykonanych geometrii. Siatka została wykonana za pomocą programu ICEM

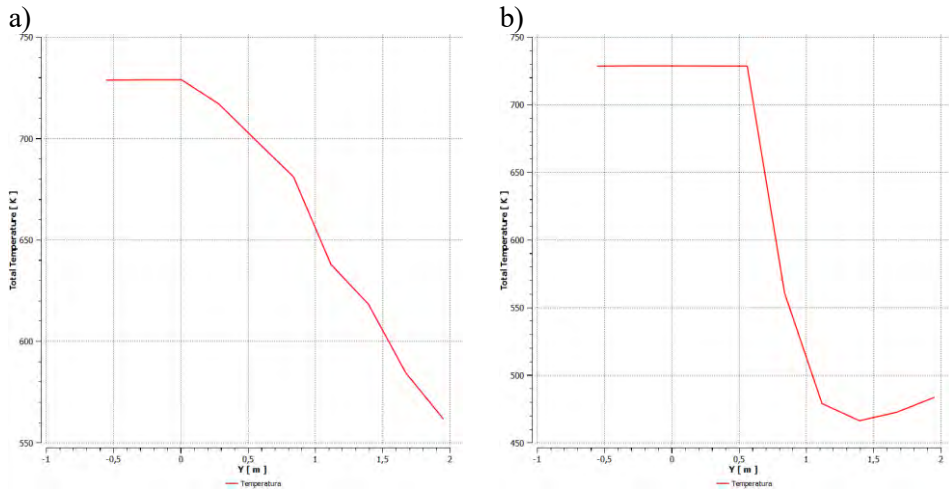
CFD. Podczas tworzenia siatki ważne było, aby współczynniki takie jak: jakość ortogonalna, współczynnik kształtu oraz wartość pochylenia były w dopuszczalnym zakresie.



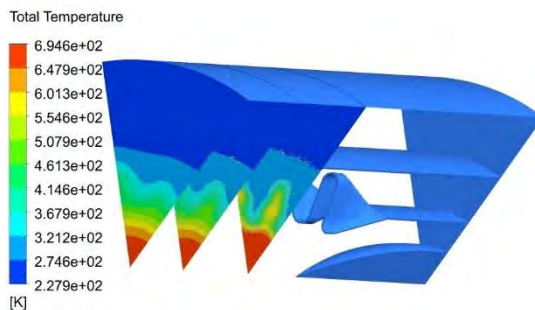
Rys. 8. Siatka wykonana w programie ICEM z mieszalnikiem spalin

4. WYNIKI SYMULACJI

Z przeprowadzonych symulacji uzyskano wyniki przepływu masy powietrza w modelu z mieszalnikiem i bez mieszalnika. W modelu z mieszalnikiem występuje lepsze mieszanie się chłodnej masy z kanały zewnętrznego z gorącą masą powietrza z kanału wewnętrznego. W modelu bez mieszalnika linie prądu układają się równoległe do osi wylotu, nie można w tym przypadku zaobserwować intensywnego mieszania strumieni. Powietrze gorące na wylocie bez mieszalnika ma temperaturę około 560K, a z mieszalnikiem około 470K. Dzieje się tak dzięki dobremu mieszanii się powietrza po wylocie z dyszy wylotowej w przypadku modelu z mieszalnikiem.



Rys. 9. Zależności temperatury od położenia na wysokości kanału wewnętrznego, a) bez mieszalnika spalin, b) z mieszalnikiem spalin



Rys. 10. Rozkład temperatury gazu w modelu z mieszalnikiem spalin.

4. PODSUMOWANIE

Producenci silników lotniczych dwuprzepływowych wciąż dążą do osiągnięcia jak największej efektywności mieszania się powietrza z kanałów zewnętrznego i wewnętrznego. Mieszalnik spalin ma na to duży wpływ. Jest montowany tak, aby jak najlepiej zapewnić mieszanie się masy powietrza rozgrzanego z chłodnym. Mieszalnik spalin znacząco obniża temperaturę gazów wylotowych i zmniejsza ślad termiczny pozostawiany przez samolot. Dzięki temu obniżony zostaje też poziom hałasu wytwarzanego przez silnik.

LITERATURA

1. A. Kozakiewicz Turbinowe silniki odrzutowe jedno- i dwuprzepływowe w samolotach bojowych. Warszawa 2010
2. Kiser, J. & Bansal, Narottam & Szelagowski, James & Sokhey, Jagdish & Heffernan, Tab & Clegg, Joseph & Pierluissi, Anthony & Riedell, Jim & Wyen, Travis & Atmur, Steven & Ursic, Joseph. (2015). Oxide/Oxide Ceramic Matrix Composite (CMC) Exhaust Mixer Development in the NASA Environmentally Responsible Aviation (ERA) Project. V006T02A002. 10.1115/GT2015-43593.
3. W. Balicki i inni Lotnicze silniki turbinowe konstrukcja, eksploatacja – diagnostyka Część I. Warszawa 2010
4. Y. Shan , J. Zhang, Numerical investigation of flow mixture enhancement and infrared radiation shield by lobed forced mixer,2009.
5. Povinelli, Louis & Anderson, B. & Gerstenmaier, William. (1980). Computation of three-dimensional flow in turbofan mixers and comparison with experimental data. 10.2514/6.1980-227.
6. R. Chachurski, J. Szczeciński, S. Szczeciński Dysze wylotowe, dopalacze, wektorowanie i odwracanie ciągu,

NUMERICAL ANALYSIS OF THE THERMAL EFFICIENCY OF A TURBOJET MIXER**Abstract**

The article provides information on exhaust gas mixers used in the aviation industry, their functions and modeling methods. The main purpose of the work is to design and build a 3D model of the exhaust gas mixer and CFD analysis. In order to determine the effect of using an exhaust gas mixer, a two-flow turbojet engine with an exhaust gas mixer and without an exhaust gas mixer was adopted for the analysis. The results are presented in the form of distributions of flow-specific quantities. Autodesk Inventor Professional, ANSYS ICEM CFD, Flu-ent, CFD-Post software were used for the project.

Keywords: aircraft turbine engine, exhaust gas mixer, turbulence, fluid mechanics.

Zbigniew KORUBA *

STEROWANIE ZESTAWEM ARTYLERYJSKO-RAKJETOWYM W WARUNKACH ODDZIAŁYWANIA ZAKŁÓCEŃ LOSOWYCH

Na współczesnym polu walki istnieje potrzeba ustawicznego zwiększania zdolności bojowych, w tym prędkości działania, zasięgu wykrywania celów, możliwości identyfikacji celów i skuteczności prowadzenia ognia przez zestawy artyleryjsko-rakietowe krótkiego zasięgu. Dużym wyzwaniem jest moliwość skutecznego prowadzenia ognia przez tego typu zestawy w warunkach oddziaływania zakłóceń nie tylko ze strony strzelającej armaty, lecz także ze strony poruszającej się platformy na której posadowiona jest armata i samonaprowadzające pociski rakietowe. Ponadto zestaw stanowi układ ze zmienną masą bowiem w krótkim czasie wystrzeliwanych może być od kilku do kilkudziesięciu, a nawet kilkuset pocisków – mamy zatem do czynienia z układem silnie nieliniowym ze zmiennymi parametrami (układem niestacjonarnym). W pracy przedstawiono sposób sterowania takim zestawem w warunkach oddziaływań kinematycznych ze strony ruchomej podstawy na której zestaw jest posadowiony oraz podczas oddawania strzałów do przechwyconego celu powietrznego. Niektóre wyniki badań symulacji numerycznych przedstawiono w graficznej postaci.

Słowa kluczowe: sterowanie, dynamika nieliniowa, linearyzacja, śledzenie celu, Filtr Kalmana

1. WPROWADZENIE

We współczesnych Zestawach Artyleryjsko-Rakietowych (ZAR) zmierza się do tego, aby przechwytywanie nisko lecących, manewrujących celów powietrznych mogło się odbywać nie tylko w każdych warunkach pogodowych, ale i podczas ruchu nosiciela po nierównościach powierzchni na której tego rodzaju zestaw się przemieszcza – zarówno po powierzchni lądowej, jak i wodnej (Rys. 1 i Rys. 2) [Koruba, Krzysztofik, i Dziopa 2010, Zarchan 2012, Gacek at al. 2016].

* Politechnika Świętokrzyska

Przykładem rozpatrywanego w niniejszej pracy zestawu jest system Pilica. Jest to system przeciwlotniczy bardzo bliskiego zasięgu dedykowany do obrony ważnych obiektów wojskowych i cywilnych, zarówno stałych, jak i ruchomych, przed atakami z powietrza z odległości do 5 km. Ma on zintegrowany system komputerowy wykrywania, identyfikacji i zarządzania zwalczaniem celów, co zapewnia mu wysoką skuteczność przy dużej mobilności i niskich kosztach eksploatacji.

Kluczowym elementem przeciwlotniczego systemu Pilica jest jego uzbrojenie – Zestaw Artyleryjsko-Rakietowy – ZUR-23-2SP Jodek. Jest on modyfikacją popularnego w Wojsku Polskim 23 mm artyleryjskiego ciągnionego zestawu przeciwlotniczego ZU-23-2. Uzbrojenie zestawu to podwójne działko kalibru 23mm o szybkostrzelności teoretycznej 2000 strz./min i zasięgu skutecznym ognia do 3 km oraz 2 przeciwlotnicze pociski raketowe GROM o zasięgu 5,5 km. Dzięki zwiększonej szybkości i precyzji śledzenia, zestaw zdolny jest nie tylko niszczyć samoloty i śmigłowce bojowe, ale również bezałogowe środki latające, a nawet pociski manewrujące. Możliwe jest też niszczenie celów lekko opancerzonych zarówno lądowych jak i nawodnych.

Sterowanie uzbrojeniem odbywa się automatycznie w pełnym zakresie, z użyciem skomputeryzowanego układu naprowadzania o wysokiej dokładności. Działa on w układzie półautomatycznym, namierzając cele i niszcząc je po potwierdzeniu przez operatora. System celowniczy jest zintegrowany z układem śledzącym i identyfikatorem IFF (Identification Friend or Foe), który jest w stanie zablokować uzbrojenie, gdy namierzonym celem będzie zidentyfikowany przez IFF własny środek latający. Zestaw ZUR-23-2SP może być obsługiwany zdalnie, a w wypadku awarii zasilania możliwe jest też działanie efektora ogniowego w trybie całkowicie manualnym.



Rys. 1. Widok ogólny zestawu artyleryjsko-rakietowego ZUR-23-2SP Jodek posadowionego na pojeździe kołowym [https://www.google.pl (dostęp 30.08.2020)]



Rys. 2. Widok ogólny zestawu artyleryjsko-rakietowego „Wróbel 2” posadowionego na okręcie [http://www.zmt.tarnow.pl (dostęp 30.08.2020)]

Zestaw wyposażony jest w stabilizowaną optoelektryczną głowicę dziennie-nocną, mogącą pracować niezależnie od uzbrojenia w zakresie obserwacji oraz wykrywania

i identyfikacji celów. Stanowi ona nie tylko element systemu naprowadzania, ale też źródło informacji dla całego systemu, gdyż dane o wykrytych i obserwowanych obiektach są wymieniane w całej sieci dowodzenia. Każdy zestaw jest też wyposażony w system ostrzegający przed promieniowaniem lasera.

W pracy rozpatrywane jest zagadnienie doboru takiego układu stabilizacji i sterowania tego rodzaju zestawem, by proces poszukiwania i śledzenia celu mógł niezawodnie zachodzić przy wspomnianych na wstępie niekorzystnych warunkach [Koruba, Krzysztofik i Dziopa 2010]. Niezbędne do tego celu jest opracowanie adekwatnego modelu matematycznego rozpatrywanego zestawu, bowiem w systemach automatycznego sterowania samobieżnego zestawu rakietowego najczęściej stosowane są regulatory typu PD lub PID, które zawodzą w przypadkach, gdy następuje zmiana struktury lub parametrów zestawu (np. podczas wystrzeliwania zapasu amunicji czy też uszkodzeń w warunkach wykonywania zadania bojowego). Ponadto, w sposób nieuchronny podczas działania zestawu, występują szумы zarówno procesowe, jak i pomiarowe, zatem istnieje konieczność odtwarzania zmiennych stanu i filtrowania danych pomiarowych. Dlatego też wykorzystano do sterowania zestawem rozszerzony filtr Kalmana, wraz ze zmodyfikowanym regulatorem LQR wykorzystującym Jacobian zamiast macierzy stanu. W wyniku tak dokonanej syntezy zastosowano zmodyfikowany regulator LQG.

Należy podkreślić, że w dostępnej literaturze nie ma opisu modelu matematycznego i badań nad zdalnie sterowanym zestawem artyleryjsko-rakietowym. Z tego powodu istnieje potrzeba prowadzenia badań teoretyczno-symulacyjnych i doświadczalnych nad tego rodzaju zestawami, które obecnie stają się coraz powszechniej stosowaną bronią przeciwlotniczą bliskiego zasięgu na współczesnym polu walki.

2. MODEL MATEMATYCZNY RUCHU ZESTAWU

Zlinearyzowane równania ruchu ZAR przedstawmy w następującej postaci [Ashish 2002, Koruba, Szmidt, Gapiński 2018]:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{ZAR}} = \mathbf{J}_{\text{ZAR}} \Delta \mathbf{x}_{\text{ZAR}} + \mathbf{B}_{\text{ZAR}} \mathbf{u}_{\text{ZAR}} + \mathbf{w}_{\text{ZAR}} \quad (1a)$$

$$\Delta \mathbf{z}_{\text{ZAR}} = \mathbf{H}_{\text{ZAR}} \Delta \mathbf{x}_{\text{ZAR}} + \mathbf{v}_{\text{ZAR}} \quad (1b)$$

gdzie:

$$\Delta \mathbf{x}_{\text{ZAR}} = \mathbf{x}_{\text{ZAR}} - \mathbf{x}_{\text{ZAR}}^* = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ x_3^* \\ x_4^* \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{\text{ZAR}}(\mathbf{x}_{\text{ZAR}}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ I_1 + I_a(\mathbf{x}_{\text{ZAR}}) + I_s & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_2} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}_{\text{ZAR}} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}.$$

przy czym $\mathbf{x}_{\text{ZAR}}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t)]^T$ – wektor rzeczywistych zmiennych stanu ZAR; $\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^* = [x_1^* \ x_2^* \ x_3^* \ x_4^*]$ – wektor zmiennych stanu ZAR w punkcie pracy, tj. wektor żądanych wartości zmiennych stanu; $\mathbf{w}_{\text{ZAR}} = [w_1, w_2, w_3, w_4]^T$ – szum procesowy (biały Gaussowski); $\Delta \mathbf{z}_{\text{ZAR}}$ – wektor wyjściowy odchylenia od wartości zadanych; $\mathbf{H}_{\text{ZAR}} = \mathbf{I}^{4 \times 4}$ – macierz pomiarowa (wyjściowa); \mathbf{v}_{ZAR} – szum pomiarowy (biały Gaussowski).

Występująca w równaniu (1a) macierz \mathbf{J}_{ZAR} stanowi Jacobian o następującej postaci:

$$\mathbf{J}_{\text{ZAR}}(\mathbf{x}_{\text{ZAR}}) = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_2} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_3} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_4} \right|_{\text{ZAR}} \\ \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_2} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_3} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_4} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} \\ \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_2} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_3} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_4} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} \\ \left. \frac{\partial g_4}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_4}{\partial x_2} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_4}{\partial x_3} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} & \left. \frac{\partial g_4}{\partial x_4} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

$$\left. \frac{\partial g_1}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = 0; \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_2} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = 1, \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_3} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = 0; \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_4} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = 0; \left. \frac{\partial g_2}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial g_2}{\partial x_2} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = - \frac{(3a(x_3)^2 + 2bx_3 + c)x_4 - \eta_1}{h_{\text{ZAR}}},$$

$$\left. \frac{\partial g_2}{\partial x_3} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = - \frac{6ax_3 + 2b}{h_{\text{ARS}}} x_2 x_4 + \frac{x_2(3a(x_3)^2 + 2bx_3 + c)[x_4(3a(x_3)^2 + 2bx_3 + c) + \eta_1]}{h_{\text{ZAR}}^2},$$

$$\left. \frac{\partial g_2}{\partial x_4} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = \frac{3a(x_3)^2 + 2bx_3 + c}{h_{\text{ZAR}}} x_2 \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = 0; \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_2} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = 0; \left. \frac{\partial g_3}{\partial x_3} \right|_{\mathbf{x}_{\text{ZAR}}^*} = 0, \\ = 0,$$

$$\left. \frac{\partial g_3}{\partial x_4} \right|_{\mathbf{x}_{ZAR}^*} = 1, \quad \left. \frac{\partial g_4}{\partial x_1} \right|_{\mathbf{x}_{ZAR}^*} = 0, \quad \left. \frac{\partial g_4}{\partial x_2} \right|_{\mathbf{x}_{ZAR}^*} = -\frac{3a(x_3)^2 + 2bx_3 + c}{I_2} x_2,$$

$$\left. \frac{\partial g_4}{\partial x_3} \right|_{\mathbf{x}_{ZAR}^*} = -\frac{a(x_3)^2 + b}{I_2} (x_2)^2 + \frac{mgr}{I_2} \sin(x_3 + \gamma), \quad \left. \frac{\partial g_4}{\partial x_4} \right|_{\mathbf{x}_{ZAR}^*} = -\frac{\eta_2}{I_2},$$

$$h_{ARS} = I_1 + np + q + a(x_3)^3 + b(x_3)^2 + cx_3 + d.$$

Z kolei funkcje $g_i = g_i(\mathbf{x}_{ARS})$, $i = 1, 2, 3, 4$ w powyższych zależnościach są prawnymi stronami nieliniowych równań stanu opisujących model dynamiki ZAR [Kwarknaak 1979, Szmidt, Koruba i Gapiński 2018]:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 = g_1 \quad (3)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{\overbrace{-(3ax_3^2 + 2bx_3 + c)x_2x_4 - \eta_1x_2}^{g_2}}{I_1 + I_a + I_s} + \frac{Q_1}{I_1 + I_a + I_s} \quad (4)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = x_4 = g_3 \quad (5)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = \frac{\overbrace{0.5(ax_3^2 + 2bx_3 + c)x_2^2 - mgr \cos(x_3 + \gamma) - \eta_2x_4}^{g_4}}{I_2} + \frac{Q_2}{I_2} \quad (6)$$

gdzie:

$x_1 = \theta_1$ – kąt azymutu ZAR,

$x_2 = \dot{\theta}_1$ – prędkość kątowna azymutu ZAR,

$x_3 = \theta_2$ – kąt elewacji ZAR,

$x_4 = \dot{\theta}_2$ – prędkość kątowna elewacji ZAR,

η_1, η_2 – współczynniki momentów sił tarcia działających w azymucie i elewacji ZAR, odpowiednio,

$I_a = ax_3^3 + bx_3^2 + cx_3 + d$ – zmienny masowy moment bezwładności zestawu względem osi pelengu,

$I_s = pn + q$ – zmienny masowy moment bezwładności zestawu względem osi azymutu, zależny od liczby naboń n w skrzyniach,

I_1 – stały masowy moment bezwładności zestawu względem osi azymutu,

I_2 – stały masowy moment bezwładności zestawu względem osi pelengu,

g – przyspieszenie grawitacyjne,

$a, b, c, d, q, m, r, \gamma$ – parametry zestawu szczegółowo opisane w pracy [Szmidt, Koruba, i Gapiński 2018],

$Q_i = M_{ci} + M_{bi} + M_{si} + M_{zi}$ ($i = 1, 2$),

M_{c1}, M_{c2} – momenty sterujące odchyleniem zestawu w azymucie i elewacji, odpowiednio,

M_{bi} – momenty zakłócające ze strony podstawy,

M_{si} – momenty zakłócające od wystrzałów,
 M_{z1}, M_{z2} – momenty zakłóceń zewnętrznych działające w azymucie i elewacji,
 odpowiednio.

3. ALGORYTM STEROWANIA ZAR ZMODYFIKOWANĄ METODĄ LQG

Prawo sterowania \mathbf{u}_{ZAR} dla ZAR określimy za pomocą metody optymalizacji liniowo-kwadratowej [Astrom 1970, Gajic 2003]) z funkcjonalem w postaci

$$I_{ZAR}(\Delta\mathbf{x}_{ZAR}, \mathbf{u}_{ZAR}) = E \left[\int_0^{t_t} (\Delta\mathbf{x}_{ZAR}^T \mathbf{Q}_{ZAR} \Delta\mathbf{x}_{ZAR} + \mathbf{u}_{ZAR}^T \mathbf{R}_{ZAR} \mathbf{u}_{ZAR}) dt \right] \quad (7)$$

Przedstawmy to prawo za pomocą wzoru []

$$\mathbf{u}_{ZAR} = -\mathbf{K}_{ZAR}(\mathbf{x}_{ZAR} - \mathbf{x}_{ZAR}^*) \quad (8)$$

gdzie \mathbf{x}_{ZAR}^* – wektor zadanych (żądanych) zmiennych stanu określających położenie Linii Obserwacji Celu (LOC). Wyznaczone są one z następujących równań (Awrejcewicz, Koruba 2013, Shneyder 1998):

$$\frac{dR_{LOC}}{dt} = V_c [\cos\chi_c \cos\sigma \cos(\varepsilon - \gamma_c) + \sin\chi_c \sin\sigma] = f_1 \quad (9a)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{V_c \cos\chi_c \sin\sigma \sin(\varepsilon - \gamma_c)}{R_{LOC} \cos\sigma} = f_2 \quad (9b)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{V_c [\cos\chi_c \sin\sigma \cos(\varepsilon - \gamma_c) - \sin\chi_c \cos\sigma]}{R_{LOC}} = f_3 \quad (9c)$$

gdzie:

ε, σ – kąty pochylenia i odchylenia linii obserwacji celu (LOC), odpowiednio,

R_{LOC} – odległość między ZAR i celem powietrznym,

V_c – prędkość celu,

χ_c, γ_c – kąty pochylenia i odchylenia wektora prędkości celu, odpowiednio.

Macierz sprzężenia \mathbf{K}_{ZAR} występująca w równaniu (8) wyznaczana jest z następującej zależności

$$\mathbf{K}_{ZAR} = \mathbf{R}_{ZAR}^{-1} \cdot \mathbf{B}_{ZAR}^T \cdot \mathbf{P}_{ZAR} \quad (10)$$

Macierz \mathbf{P}_{ZAR} jest rozwiązaniem algebraicznego równania Riccatiego

$$\mathbf{J}_{ZAR}^T \mathbf{P}_{ZAR} + \mathbf{P}_{ZAR} \mathbf{J}_{ZAR} - \mathbf{P}_{ZAR} \mathbf{B}_{ZAR} \mathbf{R}_{ZAR}^{-1} \mathbf{B}_{ZAR}^T \mathbf{P}_{ZAR} + \mathbf{Q}_{ZAR} = 0 \quad (11)$$

Występujące w równaniach (10) i (11) macierze wag \mathbf{R}_{ZAR} i \mathbf{Q}_{ZAR} sprowadzone do postaci diagonalnej, dobierane są eksperymentalnie, przy czym poszukiwania rozpoczynane są od wartości równych [Awrejcewicz, Koruba 2013]:

$$q_{ii} = \frac{1}{2x_{i\max}}, \quad r_{jj} = \frac{1}{2u_{j\max}}, \quad (i = 1, 2, \dots, 4), \quad (j = 1, 2) \quad (12)$$

gdzie:

$x_{i\max}$ – maksymalny zakres zmian i -tej wartości zmiennej stanu,

$u_{j\max}$ – maksymalny zakres zmian j -tej wartości zmiennej sterującej.

W przypadku oddziaływań na ZAR zakłóceń losowych w postaci szumów procesowych i pomiarowych zastosujemy rozszerzony filtr Kalmana. Predykcję stanu ZAR w chwili k na podstawie oceny stanu i sterowania z chwili poprzedniej zapiszmy w postaci następujących równań różnicowych [Meditch 1969, Kim 2010]:

$$\mathbf{x}_{\text{ZAR } k} = \mathbf{J}_{\text{ZAR } k-1} \mathbf{x}_{\text{ZAR } k-1} + \mathbf{B}_{\text{ZAR } k-1} \mathbf{u}_{\text{ZAR } k-1}^{\text{LQG}} + \mathbf{w}_{\text{ZAR } k-1} \quad (13)$$

$$\mathbf{z}_{\text{ZAR } k} = \mathbf{H}_{\text{ZAR } k} \mathbf{x}_{\text{ZAR } k} + \mathbf{v}_{\text{ZAR } k} \quad (14)$$

gdzie:

$k = 1, 2, 3, \dots$ – dyskretny indeks czasu i wartości początkowe, gdzie $k-1 = 0$ są szacowane z kalibracji ZAR,

$\mathbf{x}_{\text{ZAR } k}$ – wektor zawierający dyskretnne zmienne stanu ZAR,

$\mathbf{J}_{\text{ZAR } k-1}$ – dyskretna macierz przejścia ZAR,

$\mathbf{B}_{\text{ZAR } k-1}$ – dyskretna macierz wyjścia ZAR,

$\mathbf{u}_{\text{ZAR } k-1}^{\text{LQG}}$ – wartość sterowania w poprzedniej dyskretniej chwili czasu,

$\mathbf{z}_{\text{ZAR } k}$ – wektor zawierający pomiary wyjścia miennych stanu ZAR,

$\mathbf{H}_{\text{ZAR } k}$ – macierz pomiarowa,

$\mathbf{w}_{\text{ZAR } k-1}$ – wektor dyskretnego szumu procesu o zerowej wartości oczekiwanej i znanej macierzy kowariancji $\mathbf{Q}_{\text{ZAR}}^{\text{FK}}$,

$\mathbf{v}_{\text{ZAR } k}$ – wektor dyskretnego szumu pomiarowego o zerowej wartości oczekiwanej i znanej macierzy kowariancji $\mathbf{R}_{\text{ZAR}}^{\text{FK}}$.

Dyskretnie macierze przejścia i wyjścia z kolei zapiszmy w następujący sposób:

$$\mathbf{J}_{\text{ZAR } k-1} = e^{\mathbf{J}_{\text{ZAR}}(\hat{\mathbf{x}}_{\text{ZAR } k-1/k-1})\Delta t} \approx \mathbf{I} + \mathbf{J}_{\text{ZAR}}(\hat{\mathbf{x}}_{\text{ZAR } k-1/k-1})\Delta t \quad (15)$$

$$\mathbf{B}_{\text{ZAR } k-1} = \mathbf{J}_{\text{ZAR}}^{-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1/k-1})(\mathbf{J}_{\text{ZAR } k-1} - \mathbf{I}) \mathbf{B}_{\text{ZAR}}(\hat{\mathbf{x}}_{\text{ZAR } k-1/k-1}) \approx \mathbf{B}_{\text{ZAR}}(\hat{\mathbf{x}}_{\text{ZAR } k-1/k-1})\Delta t \quad (16)$$

gdzie:

Δt – dyskretny krok czasowy,

$\mathbf{J}_{\text{ZAR } k-1}$ i $\mathbf{B}_{\text{ZAR } k-1}$ – dyskretne macierze aktualizowane w każdej dyskretnej chwili czasu,

$\hat{\mathbf{x}}_{\text{ARS } k-1/k-1}$ – wektor ocen zmiennych stanu ZAR a priori (przed pomiarem).

Przewidywanie stanu ZAR w chwili k na podstawie oszacowania stanu i sterowania z poprzedniej chwili [Kwakernaak, Sivan 1997], można zapisać w następujący sposób:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{ZAR } k/k-1} = \mathbf{J}_{\text{ZAR } k-1} \hat{\mathbf{x}}_{\text{ZAR } k-1/k-1} + \mathbf{B}_{\text{ZAR } k-1} \mathbf{u}_{\text{ZAR } k-1}^{\text{LQG}} \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{\text{ZAR } k/k-1}^{\text{FK}} = \mathbf{J}_{\text{ZAR } k-1} \mathbf{P}_{\text{ZAR } k-1/k-1}^{\text{FK}} \mathbf{J}_{\text{ZAR } k-1}^{\text{T}} + \mathbf{Q}_{\text{ZAR}}^{\text{FK}} \quad (18)$$

gdzie:

$\hat{\mathbf{x}}_{\text{ZAR } k-1/k-1}$ – poprzednia ocena stanu ZAR,

$\hat{\mathbf{x}}_{\text{ARS } k/k-1}$ – ocean stanu ZAR a priori (przed pomiarem),

$\mathbf{P}_{\text{ARS } k-1/k-1}^{\text{FK}}$ – poprzednia macierz kowariancji błędu predykcji,

$\mathbf{P}_{\text{ARS } k/k-1}^{\text{FK}}$ – macierz kowariancji ZAR błędu predykcji przed pomiarem,

$\mathbf{Q}_{\text{ARS}}^{\text{FK}} = \mathbf{E}[\mathbf{w}_{\text{ARS } k-1} \mathbf{w}_{\text{ARS } k-1}^{\text{T}}]$ – macierz kowariancji ZAR szumu procesu.

Korekta oceny stanu i macierzy błędu kowariancji na podstawie pomiaru wejścia w chwili obecnej:

$$\mathbf{K}_{\text{ARS } k}^{\text{FK}} = \mathbf{P}_{\text{ARS } k/k-1}^{\text{FK}} \mathbf{H}_{\text{ARS}}^{\text{T}} (\mathbf{H}_{\text{ARS}} \mathbf{P}_{\text{ARS } k/k-1}^{\text{FK}} \mathbf{H}_{\text{ARS}}^{\text{T}} + \mathbf{R}_{\text{ARS}}^{\text{FK}})^{-1} \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{ARS } k/k} = \hat{\mathbf{x}}_{\text{ARS } k/k-1} + \mathbf{K}_{\text{ARS } k} (\mathbf{z}_{\text{ARS } k} - \mathbf{H}_{\text{ARS}}^{\text{FK}} \hat{\mathbf{x}}_{\text{ARS } k/k-1}) \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_{\text{ARS } k/k}^{\text{FK}} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{\text{ARS } k}^{\text{FK}} \mathbf{H}_{\text{ARS}}^{\text{FK}}) \mathbf{P}_{\text{ARS } k/k-1}^{\text{FK}} \quad (21)$$

gdzie:

$\mathbf{K}_{\text{ARS } k}^{\text{FK}}$ – macierz wzmocnień filtru Kalmana ZAR,

$\mathbf{R}_{\text{ARS}}^{\text{FK}} = \mathbf{E}(\mathbf{v}_{\text{ARS } k-1} \mathbf{v}_{\text{ARS } k-1}^{\text{T}})$ – macierz kowariancji szumu pomiarowego ZAR,

$\hat{\mathbf{x}}_{\text{ARS } k/k}$ – aktualna ocena stanu ZAR,

$\mathbf{P}_{\text{ARS } k/k}^{\text{FK}}$ – macierz kowariancji błędu filtracji ZAR.

W wyniku syntezy regulacji otrzymujemy regulator LQG w postaci:

$$\mathbf{u}_{\text{ARS } k}^{\text{LQG}} = -\mathbf{K}_{\text{ARS } k} \cdot (\hat{\mathbf{x}}_{\text{ARS } k/k} - \mathbf{x}_{\text{ARS } k/k}^*) \quad (22)$$

W przypadku losowych oddziaływań na układ śledzenia celu, Jacobian należy utworzyć dla modelu ruchu LOC opisanego równaniami (9). Będzie on wyglądał następująco [Kim 2010]:

$$\mathbf{J}_{\text{LOC}}(\mathbf{x}_{\text{LOC}}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial R_{\text{LOC}}} & \frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial f_1}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial f_2}{\partial R_{\text{LOC}}} & \frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial f_2}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial f_3}{\partial R_{\text{LOC}}} & \frac{\partial f_3}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial f_3}{\partial \sigma} \end{bmatrix} \quad (23)$$

gdzie:

$$\frac{\partial f_1}{\partial R_{\text{LOC}}} = 0, \quad \frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon} = -V_c \cos \chi_c \cos \sigma \sin(\varepsilon - \gamma_c),$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \sigma} = V_c [\sin \chi_c \cos \sigma - \cos \chi_c \sin \sigma \cos(\varepsilon - \gamma_c)],$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial R_{\text{LOC}}} = \frac{V_c \cos \chi_c \sin \sigma \sin(\varepsilon - \gamma_c)}{R_{\text{LOC}}^2 \cos \sigma},$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon} = -\frac{V_c \cos \chi_c \sin \sigma \cos(\varepsilon - \gamma_c)}{R_{\text{LOC}} \cos \sigma},$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \varepsilon} = \frac{V_c \cos \chi_c \sin \sigma \sin(\varepsilon - \gamma_c)}{R_{\text{LOC}}},$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \sigma} = -\frac{V_c (\cos \chi_c \cos \sigma \cos(\gamma_c - \varepsilon) + \sin \chi_c \sin \sigma)}{R_{\text{LOC}}}.$$

Wzory na dyskretny układ LOC i rozszerzony filtr Kalmana można wówczas zapisać jako [Kim 2010]:

$$\mathbf{x}_{\text{LOC } k} = \mathbf{J}_{\text{LOC } k-1} \mathbf{x}_{\text{LOC } k-1} + \mathbf{w}_{\text{LOC } k-1} \quad (24)$$

$$\mathbf{z}_{\text{LOC } k} = \mathbf{H}_{\text{LOC}} \mathbf{x}_{\text{LOC } k} + \mathbf{v}_{\text{LOC } k} \quad (25)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{LOC } k/k-1} = \mathbf{J}_{\text{LOC } k-1} \hat{\mathbf{x}}_{\text{LOC } k-1/k-1} \quad (26)$$

$$\mathbf{P}_{\text{LOC } k/k-1}^{\text{FK}} = \mathbf{J}_{\text{LOC } k-1} \mathbf{P}_{\text{LOC } k/k-1}^{\text{FK}} \mathbf{J}_{\text{LOC } k-1}^{\text{T}} + \mathbf{Q}_{\text{LOC}}^{\text{FK}} \quad (27)$$

$$\mathbf{K}_{\text{LOC } k}^{\text{FK}} = \mathbf{P}_{\text{LOC } k/k-1}^{\text{FK}} \mathbf{H}_{\text{LOC}}^{\text{T}} (\mathbf{H}_{\text{LOC}} \mathbf{P}_{\text{LOC } k/k-1}^{\text{FK}} \mathbf{H}_{\text{LOC}}^{\text{T}} + \mathbf{R}_{\text{LOC}}^{\text{FK}})^{-1} \quad (28)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{LOC } k/k} = \hat{\mathbf{x}}_{\text{LOC } k/k-1} + \mathbf{K}_{\text{LOC } k} (\mathbf{z}_{\text{LOC } k} - \mathbf{H}_{\text{LOC}}^{\text{FK}} \hat{\mathbf{x}}_{\text{LOC } k/k-1}) \quad (29)$$

$$\mathbf{P}_{\text{LOC } k/k}^{\text{FK}} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{\text{LOC } k}^{\text{FK}} \mathbf{H}_{\text{LOC}}^{\text{FK}}) \mathbf{P}_{\text{LOC } k/k-1}^{\text{FK}} \quad (30)$$

gdzie:

$\mathbf{x}_{\text{LOC } k}$ – wektor zmiennych wyjściowych LOC,
 $\hat{\mathbf{x}}_{\text{LOC } k-1/k-1}$ – poprzednie oceny stanu,
 $\hat{\mathbf{x}}_{\text{LOC } k/k-1}$ – ocena zmiennych stanu LOC a priori (przed pomiarem),
 $\mathbf{J}_{\text{LOC } k-1} = \mathbf{I} + \mathbf{J}_{\text{LOC}}(\hat{\mathbf{x}}_{\text{LOC } k-1/k-1})\Delta t$ – macierz stanu LOC w dyskretnej postaci,
 $\mathbf{P}_{\text{LOC } k-1/k-1}^{\text{FK}}$ – poprzednia macierz kowariancji błędu predykcji dla LOC,
 $\mathbf{z}_{\text{LOC } k}$ – aktualne pomiary z głowicy skanująco-śledzącej w czasie k ,
 $\mathbf{P}_{\text{LOC } k/k-1}^{\text{FK}}$ – macierz kowariancji błędu predykcji po pomiarze dla LOC,
 $\hat{\mathbf{x}}_{\text{LOC } k/k}$ – aktualna ocena stanu LOC (a posteriori),
 $\mathbf{Q}_{\text{LOC } k}^{\text{FK}} = \text{E}[\mathbf{w}_{\text{LOC } k-1}\mathbf{w}_{\text{LOC } k-1}^T]$ – macierz kowariancji szumu procesu dla LOC,
 $\mathbf{R}_{\text{LOC } k}^{\text{FK}} = \text{E}[\mathbf{v}_{\text{LOC } k-1}\mathbf{v}_{\text{LOC } k-1}^T]$ – macierz kowariancji szumu pomiaru dla LOC,
 $\mathbf{w}_{\text{LOC } k} = [w_{R \text{ LOC } k}, w_{\varepsilon \text{ LOC } k}, w_{\sigma \text{ LOC } k}]^T$, $\mathbf{v}_{\text{LOC } k} = [v_{R \text{ LOC } k}, v_{\varepsilon \text{ LOC } k}, v_{\sigma \text{ LOC } k}]^T$ – szумы pomiarowe i procesowe (białe Gaussowskie).

Uwzględniając filtrację Kalmana linii obserwacji celu, regulator LQG do sterowania zestawem artyleryjsko-rakietowym przy oddziaływaniu przypadkowych zakłóceń, będzie wyglądał następująco [Kim 2010, Resnic, Holiday 2012]:

$$\mathbf{u}_{\text{ARS } k}^{\text{LQG}} = \mathbf{K}_{\text{ARS } k} \left(\hat{\mathbf{x}}_{\text{ARS } k/k} - [\hat{\sigma}_{\text{ARS } k/k} \quad \hat{\sigma}_{\text{ARS } k/k} \quad \hat{\varepsilon}_{\text{ARS } k/k} \quad \hat{\varepsilon}_{\text{ARS } k/k}]^T \right) \quad (31)$$

gdzie $\hat{\sigma}_{\text{ARS } k/k}$ i $\hat{\varepsilon}_{\text{ARS } k/k}$ można aproksymować metodą różnic skończonych.

Z tego powodu optymalne momenty sterujące, które wykorzystamy do sterowania ZAR podczas śledzenia i strzelania do manewrującego celu powietrznego, przyjmą postać:

$$M_{c1} = u_{\text{ZAR } k}^{\text{LQG}}(1), M_{c2} = u_{\text{ZAR } k}^{\text{LQG}}(2) \quad (32)$$

Momenty (32) są wprowadzane na wejście układu nieliniowego (1)-(4) i obejmują następujące ograniczenia:

$$|M_{c1}| \leq M_{c1\text{max}}; |M_{c2}| \leq M_{c2\text{max}} \quad (33)$$

gdzie:

$M_{c1\text{max}}$ – maksymalnie dopuszczalne momenty sterujące w azymucie,

$M_{c2\text{max}}$ – maksymalnie dopuszczalne momenty sterujące w elewacji.

Nierówności (33) modelują nasycenie momentów napędowych ZAR.

4. PRZYKŁAD LICZBOWY I OTRZYMANE WYNIKI

Rozpatrzmy hipotetyczny zestaw artyleryjsko-rakietowy, który wykrył i śledzi manewrujący nisko lecący cel powietrzny. Podstawowe parametry rozważanego ze-

stawu zaczerpnięte zostały z pracy [Szmidt, Koruba, Gapiński 2018]. Symulacje numeryczne przeprowadzone zostały w środowisku MATLAB z krokiem całkowania $dt=0.001$ [s]. Przyjęte zostały następujące warunki początkowe zmiennych stanu ZAR i ich ocen:

$$\mathbf{x}_{ZAR0} = [0 \quad 1.5 \quad 0 \quad 2.5], \hat{\mathbf{x}}_{ZAR0} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

Macierze wag dla sterowań optymalnych LQR:

$$\mathbf{Q}_{ZAR} = \begin{bmatrix} 40000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 40000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}; \mathbf{R}_{ZAR} = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 \\ 0 & 0.0001 \end{bmatrix}.$$

Skuteczność zmodyfikowanych regulatorów LQR i LQG zbadana została poprzez porównanie z optymalnie dobranymi nastawami regulatora PID opisanego w pracy [Zhuang, Atherton 1993].

Przyjęto, że macierz pomiarowa zmiennych stanu ZAR jest następująca:

$$\mathbf{H}_{ZAR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

Macierz kowariancji szumu procesu ZAR – $\mathbf{Q}_{ZAR}^{FK} = \alpha_{proc}^2 \mathbf{H}_{ZAR} \mathbf{H}_{ZAR}^T$, gdzie $\alpha_{proc} = 0.1$ – amplituda szumu procesu; macierz kowariancji szumu pomiaru ZAR – $\mathbf{R}_{ZAR}^{FK} = \alpha_{mes}^2 \mathbf{H}_{ZAR} \mathbf{H}_{ZAR}^T$, gdzie $\alpha_{mes} = 0.1$ – amplituda szumu pomiaru; macierz kowariancji warunków początkowych; początkowa macierz kowariancji błędu estymacji zmiennych stanu ZAR – $\mathbf{P}_{ZAR} = \mathbf{Q}_{ZAR}^{FK}$. Natomiast dane celu powietrznego mają następujące wartości:

- położenie celu względem ZAR w chwili jego wykrycia przez głowicę obserwacyjno-śledzącą – $x_{c0} = 1000$ [m]; $y_{c0} = 1000$ [m]; $z_{c0} = 500$ [m];

- prędkość poruszającego się celu – $V_c = 100 \left[\frac{m}{s} \right] = \text{const}$;

- warunki początkowe obserwacji celu: – $R_{LOS0} = \sqrt{x_{c0}^2 + y_{c0}^2 + z_{c0}^2}$; $\varepsilon_0 = \arctg \frac{y_{c0}}{x_{c0}}$; $\sigma_0 = \arcsin \frac{z_{c0}}{R_{LOS0}}$; $\gamma_{c0} = 0$; $\chi_{c0} = 0$; $\omega_{c0} = 0.75 \left[\frac{rad}{s} \right]$ – prędkość kątowna manewru celu.

Założono, że kąty lotu celu zmieniają się według prawa (manewr celu): $\gamma_c = \omega_{c0}t$; $\chi_c = \omega_{c0}t$.

Biorąc pod uwagę, że odległość R_{LOS} mierzona jest za pomocą dalmierza laserowego, przyjęto że macierz pomiarowa układu obserwacji celu ma postać:

$$\mathbf{H}_{LOS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Natomiast warunki początkowe dla poszczególnych wektorów stanu przyjęto następujące:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{\text{LOC}0} &= [R_{\text{LOS}0} \quad \varepsilon_0 \quad \sigma_0]^T \\ \hat{\mathbf{x}}_{\text{LOC}0} &= [0.8R_{\text{LOS}0} \quad 0.9\varepsilon_0 \quad 0.9\sigma_0]^T \\ \hat{\mathbf{x}}_{\text{ZAR}0}^* &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T\end{aligned}$$

Macierz kowariancji szumu procesu LOC – $\mathbf{Q}_{\text{LOC}}^{\text{FK}} = \alpha_{\text{proc}}^2 \mathbf{H}_{\text{LOC}} \mathbf{H}_{\text{LOC}}^T$; macierz kowariancji szumu pomiaru LOC – $\mathbf{R}_{\text{LOC}}^{\text{FK}} = \alpha_{\text{proc}}^2 \mathbf{H}_{\text{LOC}} \mathbf{H}_{\text{LOC}}^T$; początkowa macierz kowariancji błędu estymacji zmiennych stanu LOC $\mathbf{P}_{\text{LOC}} = \mathbf{Q}_{\text{LOS}}^{\text{FK}}$.

Wprowadzono zaburzenie w postaci trzech oddanych strzałów symulowanych jako impulsy prostokątne w postaci:

$$\begin{aligned}M_{s1} &= \Pi(t_{z11}, t_{z12})M_{01} + \Pi(t_{z21}, t_{z22})M_{01} + \Pi(t_{z31}, t_{z32})M_{01}, \\ M_{s2} &= \Pi(t_{z11}, t_{z12})M_{02} + \Pi(t_{z21}, t_{z22})M_{02} + \Pi(t_{z31}, t_{z32})M_{02},\end{aligned}$$

gdzie:

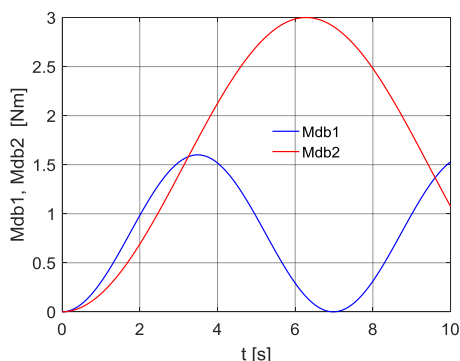
$t_{z11} = 3.00$ [s], $t_{z12} = 3.02$ [s], $t_{z21} = 3.22$ [s], $t_{z22} = 3.24$ [s], $t_{z31} = 3.44$ [s], $t_{z32} = 3.46$ [s] – chwile oddawania poszczególnych strzałów, $M_{01} = 1000$ [Nm], $M_{02} = 12000$ [Nm] – momenty sił działających od wystrzału w azymucie i elewacji, odpowiednio, $\Pi(\dots)$ – funkcja skoku prostokątnego działająca w przedziale czasu $[t_{zi1}; t_{zi2}]$, $i = 1, 2, 3$.

Przyjęto, że ze strony podstawy na której posadowiony jest zestaw działają zakłócenia zarówno w azymucie, jak i elewacji w postaci następujących momentów:

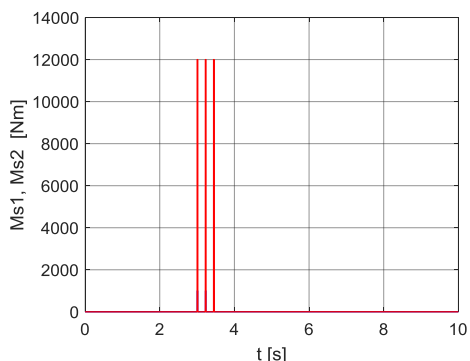
$$\begin{aligned}M_{b1} &= 100 \cdot \left[\sin\left(0.9t - \frac{\pi}{2}\right) + 1 \right], M_{b2} = 200 \cdot \left[\sin\left(0.5t - \frac{\pi}{2}\right) + 1 \right], \\ M_{c1\text{max}} &= 1000 \text{ Nm}, M_{c2\text{max}} = 12000 \text{ Nm}.\end{aligned}$$

Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych zostały przedstawione na Rys. 3–19. Przebiegi w czasie momentów zakłócających ze strony podstawy i oddanych trzech strzałów zostały pokazane na Rys. 3 i 4. Na Rys. 5–14 porównana została skuteczność działania zmodyfikowanego regulatora LQR (wykresy z prawej strony) względem regulatora z optymalnie dobranymi nastawami PID (wykresy z lewej strony). Z kolei Rys 15–19 przedstawiają skuteczność działania zmodyfikowanego regulatora LQG przy jednoczesnym działaniu zakłóceń ze strony podstawy, zaburzeń podczas oddawania trzech strzałów oraz występowania szumów w ZAR i LOS zarówno procesowych, jak i pomiarowych. Wyniki badań ewidentnie pokazują skuteczniejsze działanie zmodyfikowanych regulatorów LQR względem optymalnego regulatora PID w przypadku działania zakłóceń. Widać to szczególnie na Rys. 7 i 8.

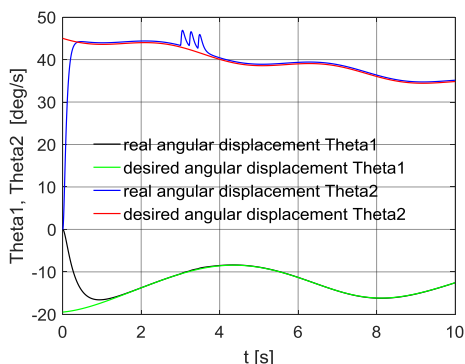
Natomiast przy działaniu zakłóceń losowych regulator LQR staje się także niewystarczający do zapewnienia precyzji śledzenia LOC (patrz Rys. 13 i 14). W takim przypadku najskuteczniejsze działanie wykazuje zmodyfikowany regulator LQG. Pokazują to Rys. 15–19.



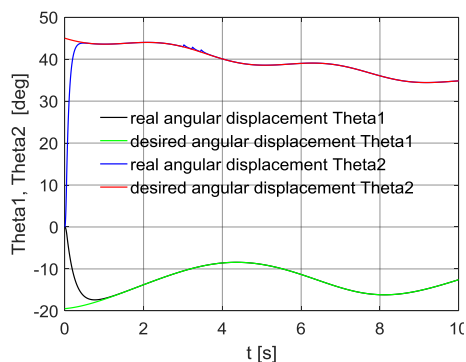
Rys. 3. Momenty zakłócające w funkcji czasu działające ze strony podstawy na ZAR



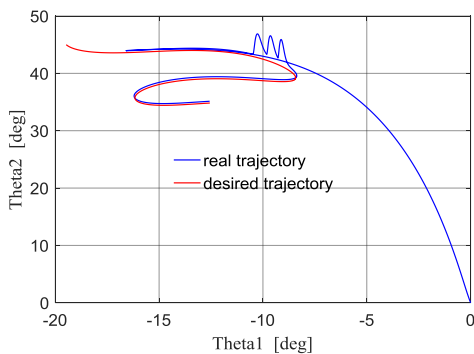
Rys. 4. Momenty zakłócające w funkcji czasu przy oddaniu 3 strzałów działających na ZAR



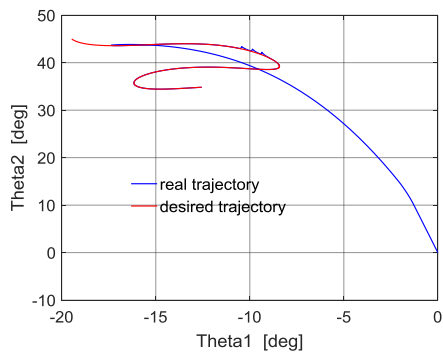
Rys. 5. Przemieszczenia kątowe realizowane i żądane w azymucie i elewacji przy działaniu zakłóceń – sterowanie PID



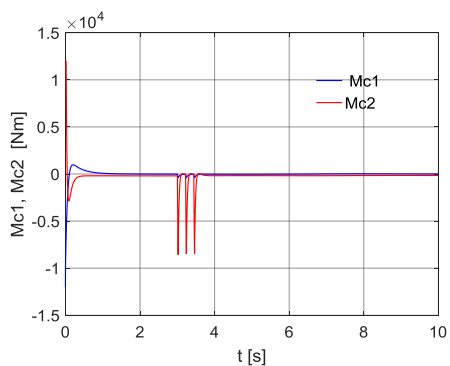
Rys. 6. Przemieszczenia kątowe realizowane i żądane w azymucie i elewacji przy działaniu zakłóceń – sterowanie LQR



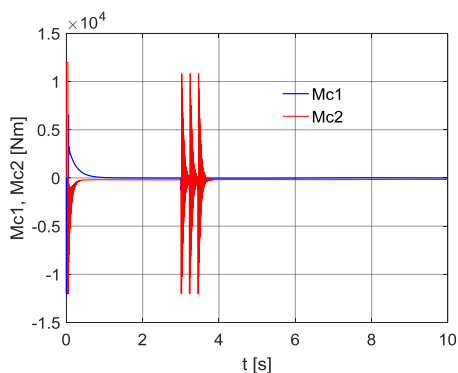
Rys. 7. Tory realizowane i żądane ZAR przy działaniu zakłóceń – sterowanie PID



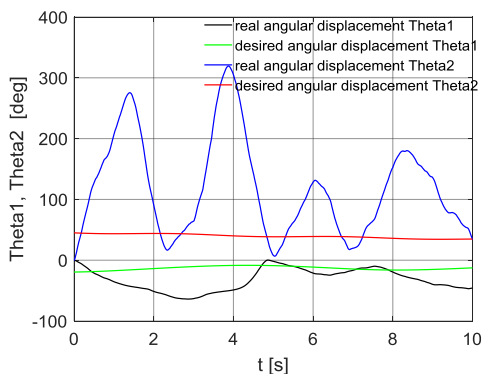
Rys. 8. Tory realizowane i żądane ZAR przy działaniu zakłóceń – sterowanie LQR



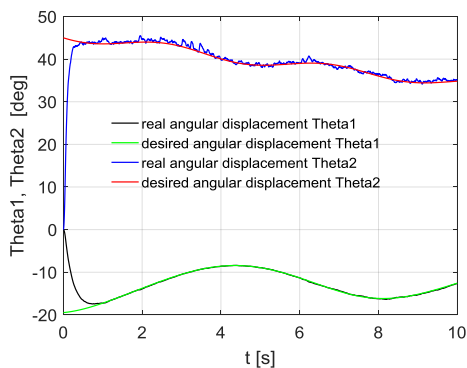
Rys. 9. Momenty sterujące w funkcji czasu w azymucie i elewacji – sterowanie PID



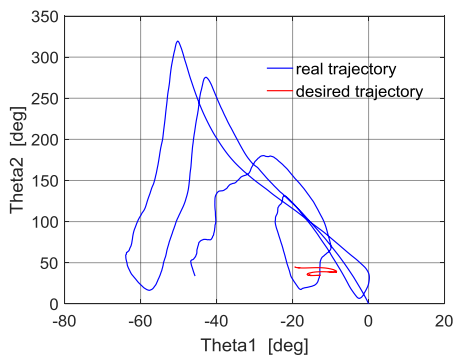
Rys. 10. Momenty sterujące w funkcji czasu w azymucie i elewacji – sterowanie LQR



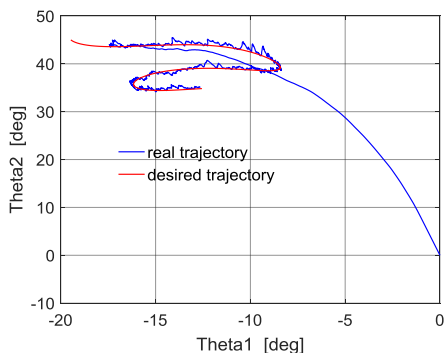
Rys. 11. Przeszczenia kątowe realizowane i żądane w azymucie i elewacji przy działaniu zakłóceń losowych – sterowanie PID



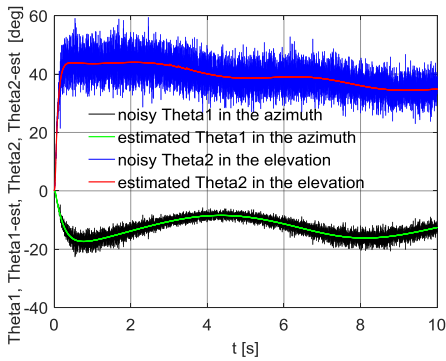
Rys. 12. Przeszczenia kątowe realizowane i żądane w azymucie i elewacji przy działaniu zakłóceń losowych – sterowanie LQR



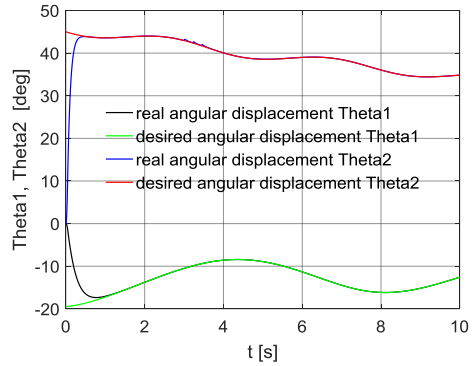
Rys. 13. Tory realizowane i żądane ZAR przy działaniu zakłóceń losowych – sterowanie PID



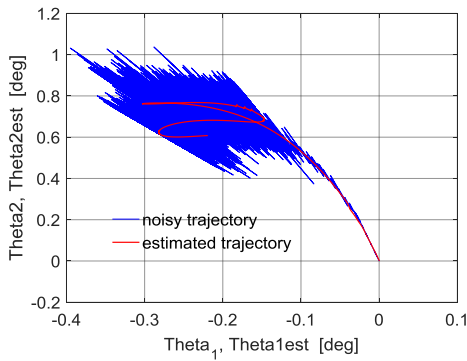
Rys. 14. Tory realizowane i żądane ZAR przy działaniu zakłóceń losowych – sterowanie LQR



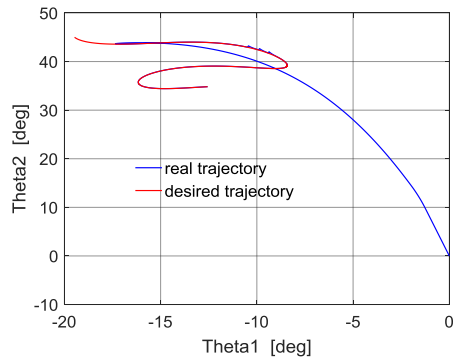
Rys. 15. Przemieszczenia kątowe zażądane i estymowane w azymucie i elewacji – sterowanie LQG



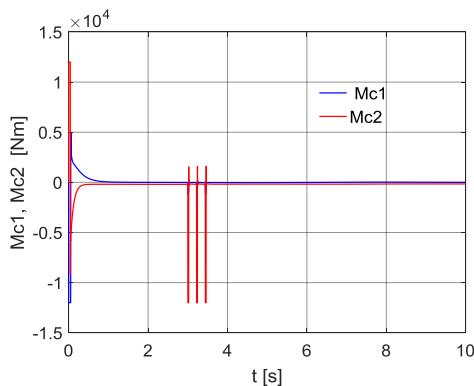
Rys. 16. Przemieszczenia kątowe żądane i estymowane w azymucie i elewacji – sterowanie LQG



Rys. 17. Tory zażądane i estymowane SAR – sterowanie LQG



Rys. 18. Tory żądane i estymowane SAR – sterowanie LQG



Rys. 19. Momenty sterujące LQG w funkcji czasu w azymucie i elewacji

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiony w niniejszej pracy algorytm pozwala na precyzyjne sterowanie układem ZAR w przypadku działania zakłóceń. Analizowany w danym artykule przykład pokazuje, że śledzenie przez ZAR manewrującego celu powietrznego, z wykorzystaniem Jacobianu w zamkniętej pętli sterowania, jest efektywniejsze aniżeli z zastosowaniem klasycznego sterowania metodą PID czy też LQR. Jak wykazały wstępne wyniki badań, poprawa precyzji sterowania ZAR o około 10% może mieć decydujące znaczenie w osiągnięciu celu w systemach artyleryjsko-rakietowych tego typu.

W efekcie, algorytm pozwala na takie sterowanie zestawem, aby stało się możliwe zminimalizowanie wpływu na niego kinematycznych oddziaływań ze strony poruszającego się nośnika (pojazdu terenowego lub okrętu) i losowych zakłóceń zewnętrznych. Zwiększa to jego skuteczność i mobilność oraz pozwala atakować cele powietrzne podczas ruchu podstawy po nierównościach powierzchni. W przypadku, gdy podstawę stanowi pojazd lądowy, to strzelanie może się odbywać bez konieczności jego zatrzymywania.

Rozważania teoretyczne i badania symulacyjne wykazały, że w warunkach występowania zakłóceń losowych działających na ZAR zasadne jest zastosowanie Jacobianów zarówno w rozszerzonej filtracji Kalmana, jak i przy wyznaczaniu sterowań optymalnych metodą LQR. W ten sposób w niniejszej pracy wykazana została efektywność działania zmodyfikowanego regulatora LQG. W dalszych badaniach efektywność wspomnianego regulatora należy przetestować w warunkach poligonowych podczas strzelań zestawu artyleryjsko-rakietowego do nisko lecącego manewrującego celu powietrznego.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Astrom K., Introduction to Stochastic Control Theory, Academic Press, New York, (1970).
2. Ashish T. Modern control design with Matlab and Simulink. John Wiley & Sons, New York (2002).
3. Awrejcewicz, J., Koruba, Z., Classical Mechanics. Applied Mechanics and Mechatronics. Advances in Mechanics and Mathematics, Monograph, Springer, v. 30, (2013).
4. Gajic Z. Linear Dynamic Systems and Signals, Prentice Hall, (2003).
5. Kim, P. Kalman Filter for Beginners with MATLAB Examples. A-JIN Publishing, (2010).
6. Kwakernaak, H. and Sivan, R. Linear optimal control systems, New York Wiley-Interscience, (1979).

7. Meditch, J.S. Stochastic Optimal Linear Estimation and Control, McGraw-Hill, pp. 312, (1969).
8. Resnic R., Holliday D., 1997, Fizyka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
9. Shneyder, N.A., Missile Guidance and Pursuit: Kinematics, Dynamics and Control, Horwood Publishing Chichester, (1998).
10. Zarchan, P., 2012, Tactical and strategic missile Guidance, in MIT Lincoln Laboratory Lexington, Massachusetts.

Artykuły w czasopismach

1. Koruba, Z., Krzysztofik, I. and Dziopa, Z., 2010, An analysis of the gyroscope dynamics of an anti-aircraft missile launched from a mobile platform. In Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences, DOI: 10.2478/v10175-010-0069-4, pp. 645-650.
2. Koruba, Z., Szmidt, P., Gapiński, D., 2018, Analysis of Dynamics of Remote-Controlled Artillery-Missile System. In Problems of Mechatronics., 9 (2). DOI 10.5604/01.3001.0012.1102, pp. 73-84.
3. Szmidt, P., Koruba, Z. and Gapiński, D., 2018, Control of missile-artillery system with modified linear-quadratic regulator (in Polish), in Scientific Letters of Rzeszow University of Technology. Mechanics, t. XXXV, z. 90, DOI 10.7862/rm.2018.19, pp. 223-235.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Gacek, J. et al., 2016, Structure and innovative Technologies In the new Polish 35 mm naval weapon system. In Conference materials of 11th International Armament Conference on Scientific Aspects of Armament & Safety Technology, pp. 246-247.
2. Zhuang, M., Atherton, D.P., 1993, Automatic tuning of optimum PID controllers, in IEE Proc D; 140 (3), DOI: 10.1049/ip-d.1993.0030, pp. 216-224.

Komunikaty Internetowe

1. https://www.google.pl/search?q=zestaw+artyleryjsko+rakietowy+pil-ica&sa=N&tbn=isch&tbo=u&source=univ&ved=0ahUKEwiul7fspPzVAhUD-MJoKHSbcBww4ChDsCQg9&biw=1440&bih=791#imgrc=oiW_WgjtvmhKM: (Accessed: 30 August 2020).
2. <http://www.zmt.tarnow.pl/wordpress/item/23mm-przeciwlotniczy-morski-zestaw-artyleryjsko-rakietowy-zu-23-2mr/> (Accessed: 30 August 2020).

THE CONTROL OF THE ARTILLERY AND MISSILE SYSTEM UNDER CONDITIONS IMPACT OF RANDOM DISTURBANCES

Abstract

On today's battlefield, there is a constant need to increase combat capabilities, including speed, target detection range, target identification capabilities, and shooting effectiveness by short-range Artillery-Rocket Set (ARS). The challenge is to be able to successfully fire such kits in response to interference not only from the cannon side but also from the moving platform on which the cannon and homing missiles are mounted. Also, the set is a variable mass system, because in a short time it can be fired from a few to dozens or even hundreds of missiles - so we are dealing with a strongly nonlinear system with variable parameters (non-stationary). The work presents how to control such a set. In case ARS is mounted on a moving base and there are both process and measurement noise, it is necessary to restore the states variables and filter data of ARS. This is why the extended Kalman filter is used, along with the LQR regulator. As a result of this synthesis, it was received Linear Quadratic Gauss (LQG) regulator of ARS, which was used to the tracking of the target according to the line of sight. The main purpose of the paper is to develop control algorithms to improve the efficiency of ARS control in elevation and azimuth and thus improve the precision of achieving and destroying the maneuverable air target. Some results of numerical simulation tests are presented in graphical form.

Keywords: control; nonlinear ODE dynamics; linearization; target tracking; Kalman filter

Natalia LEWANDOWSKA*

ANALITYCZNE WYZNACZENIE FUNKCJI PULSACJI CIŚNIENIA W TĘTNICY

W artykule przedstawiono procedurę analitycznego rozwiązania równania pulsacji ciśnienia realizując koncepcję analogii hydraulicznej Windkessela. Wyznaczono analityczne rozwiązanie dla dwóch koncepcji modelu: dwuparametrowego i trójparametrowego. Rezultaty pokazują, że uwzględnienie impedancji charakterystycznej naczyniowej lepiej odzwierciedla pulsacje ciśnienia w fazie skurczowej, co jest bardzo istotne w przypadku modelowania przepływu krwi w tętnicach.

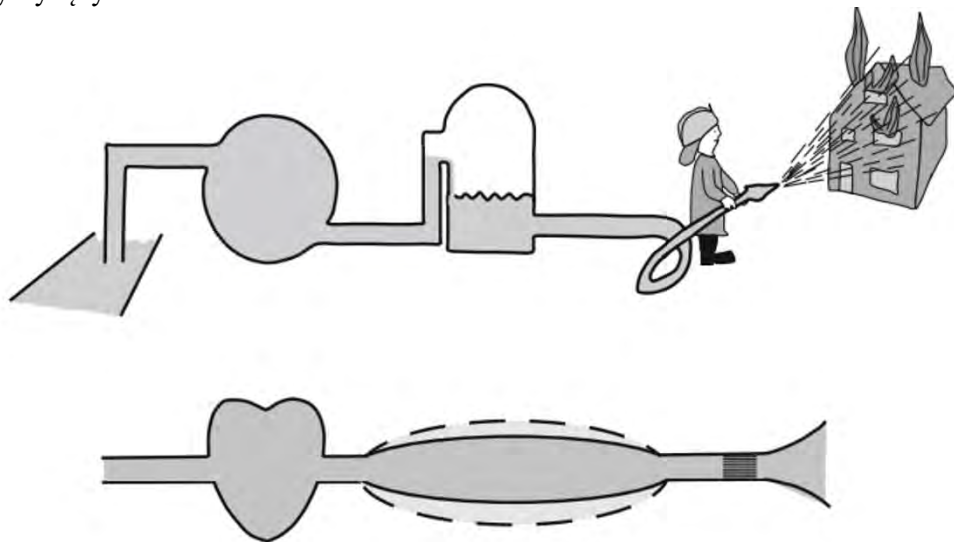
Słowa kluczowe: przepływ krwi, Windkessel, pulsacja ciśnienia, funkcje analityczne

1. WPROWADZENIE

Ciśnienie w układzie tętniczym nie jest stałe, lecz zmienia się w czasie jednego cyklu pracy serca. Zmiany te są związane z elastycznością dużych tętnic oraz oporem naczyniowym. Pierwszą udaną próbę zamodelowania fizycznego reakcji ciśnienia podjął Weber [Wetterer 1968] wykorzystując analogię do systemu gaszenia wody w wozach strażackich (Rysunek 1). Koncepcja analogii Windkessela została zaproponowana pierwszy raz przez Franka [Frank 1899] z wykorzystaniem modelu 2-parametrowego. Opisuje on hemodynamikę układu tętniczego w kategoriach oporu naczyniowego i oraz pojemności tętniczej naczynia krwionośnego. Odzwierciedla on spadek ciśnienia tętniczego w fazie rozkurczowej oraz wzrost tego ciśnienia w fazie skurczowej. Przedstawiony przez Franka model w ówczesnych czasach dobrze spełniał swoją rolę, jednak wraz z rozwojem medycyny, zwłaszcza rezonansu magnetycznego, zauważono, że model Franka nie jest dokładny i konieczne jest jego ulepszenie. Pierwszy

* Politechnika Poznańska, Instytut Energetyki Ciepłej

tą różnicę zauważył i opublikował Wetterer [Wetterer 1954] porównując ze sobą zmierzoną i zamodelowaną pulsację ciśnienia. Nie zasugerował jednak, co mogłoby być przyczyną tych różnic.



Rys. 1. Koncepcja analogii hydraulicznej Windkessela [Westerhof et.al. 2008]

Największą trudnością w prawidłowym wyznaczeniu pulsacji ciśnienia jest zamodelowanie funkcji w fazie skurczowej, gdzie następuje wyrzut krwi z serca do naczyń krwionośnych. Najpopularniejszymi modelami stosowanymi do zamodelowania tego zjawiska jest model Windkessela w koncepcji analogii elektrycznej uwzględniający, poza klasycznymi dwoma parametrami, dodatkowy parametr uwzględniający charakterystyczny opór naczyniowy zastawek sercowych. W poniższym artykule zostanie przedstawione przebiegi ciśnienia w czasie zamodelowane dla tych dwóch różnych koncepcji oraz zostaną ze sobą porównane, by wykazać, dlaczego 3-parametrowy model Windkessela lepiej odzwierciedla pulsację ciśnienia, zwłaszcza w przypadku dużych tętnic.

2. ROZWIĄZANIE ANALITYCZNE PULSACJI CIŚNIENIA

3.1. Dane wejściowe

Do obu rozważanych modeli zastosowano takie same dane wejściowe, którymi jest informacja o objętości krwi przetłaczanej przez serce w czasie jednego cyklu pracy serca. Wyrzut krwi do tętnicy ma miejsce w czasie fazy skurczowej. W tym czasie zostaje wypompowana przez serce objętość krwi równa około 120 ml na cykl [red. Rubbenstein 2022]. Zatem funkcję strumienia objętości krwi przetłaczanej przez serce można opisać zależnością:

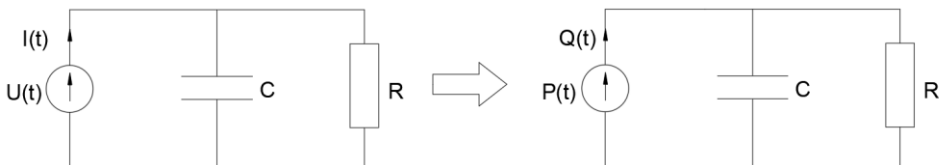
$$Q(t) = \begin{cases} A_1 \sin(\omega t) & \text{dla } t \leq t_{skurcz} \\ 0 & \text{dla } t > t_{skurcz} \end{cases} \quad (1)$$

$$A_1 = \frac{2\pi}{3} V_{krwi}, \omega = \frac{3\pi}{T}, t_{skurcz} = 0,3T + kT, \text{ gdzie } k \in \mathbb{N} \quad (2)$$

gdzie V_{krwi} – objętość wytłaczanej krwi [ml], T – okres jednego cyklu pracy serca [s], ω – prędkość pulsacji wynikająca z założonego tętna. Tętno spoczynkowe zdrowego dorosłego człowieka (HR) wynosi 70 uderzeń na minutę, tak więc $T = HR/60$, a $\omega = 2\pi/T$.

3.2. Model 2-parametryczny

Model 2-parametrowy w analogii elektrycznej przedstawiono na rysunku 2. Układ składa się z dwóch elementów: rezystora odpowiadającego za opór naczyniowy R oraz kondensatora odzwierciedlającego pojemność naczyniowa. Pojemność naczyniowa C jest związana z gromadzeniem się energii w ściankach tętnicy w fazie skurczowej, która następnie jest oddawana spowrotem do przepływu w fazie rozkurczowej. Wartości R i C zostały zaczerpnięte z literatury [Segers et.al 2000] gdzie zostały wyznaczone jako wartości średnie z pomierzonej grupy pacjentów zdrowych, niecierpiących na nadciśnienie ani żadne schorzenia kardiologiczne.



Rys. 2. Model 2-parametryczny i jego interpretacja elektryczna

Model analityczny 2-parametrowego modelu Windkessela jest opisany poniższym równaniem:

$$P(t) + RC \frac{dP(t)}{dt} = Q(t) \quad (3)$$

Rozwiązanie dla fazy rozkurczowej:

$$P(t) = C_1 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4)$$

Stałą C_1 można znaleźć przy zastosowaniu warunku końcowego $P(T) = p_{rozkurcz}$:

$$C_1 = p_{rozkurcz} e^{\frac{T}{RC}} \quad (5)$$

Dla fazy skurczowej, równanie 3 można rozwiązać poprzez metodę uzmienniania stałej. Można wtedy wyznaczyć tą stałą za pomocą równania całkowego:

$$C_1(x) = \frac{1}{C} A_1 \int e^{\frac{t}{RC}} \sin(\omega t) dt \quad (6)$$

Rozwiązanie powyższego równania:

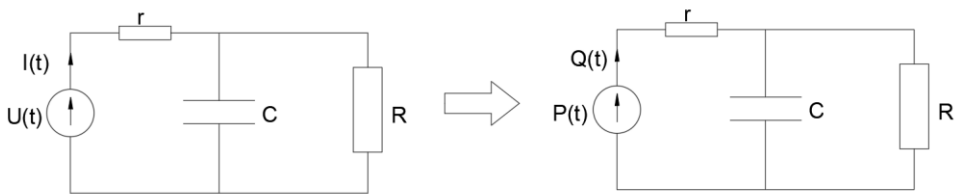
$$C_1(x) = \frac{(\omega RC)^2}{(\omega RC)^2 + 1} \left[-\frac{1}{\omega} e^{\frac{t}{RC}} \cos(\omega t) + \frac{1}{\omega^2 RC} e^{\frac{t}{RC}} \sin(\omega t) \right] + C_2 \quad (7)$$

Podstawiając powyższą zależność do równania 3, wykorzystując warunek początkowy $P(0) = p_{rozkurcz}$ dla rozwiązania stałej C_2 oraz odpowiednio przekształcając otrzymuje się następującą zależność:

$$P(x) = \frac{(\omega RC)^2}{(\omega RC)^2 + 1} \left[-\frac{1}{\omega} \cos(\omega t) + \frac{1}{\omega} \right] + \frac{1}{\omega^2 RC} e^{\frac{t}{RC}} \sin(\omega t) + p_{rozkurcz} \quad (8)$$

3.3. Model 3-parametryczny

W odróżnieniu od modelu 2-parametrowego, model 3-parametrowy został uzupełniony o dodatkowy parametr nazywany oporem charakterystycznym r uwzględniającym m.in. opór zastawek tętnicznych. Na rysunku 3 przedstawiono schemat modelu w analogii elektrycznej.



Rys. 3. Model 3-parametryczny i jego interpretacja elektryczna

Model analityczny 3-parametrowego modelu Windkessela jest opisany poniższym równaniem:

$$P(t) + CR \frac{dP(t)}{dt} = (R + r)Q(t) + CRr \frac{dQ(t)}{dt} \quad (9)$$

Rozwiązanie równania 9 dla fazy rozkurczowej:

W przypadku fazy rozkurczowej, objętość tłoczona krwi jest równa zero. Tak więc równanie 1 można przedstawić w postaci:

$$P(t) + CR \frac{dP(t)}{dt} = 0 \quad (10)$$

Rozwiązanie powyższego równania przedstawia się następująco:

$$P(t) = C_1 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (11)$$

Stałą C_1 można znaleźć przy zastosowaniu warunku końcowego $P(T) = p_{\text{rozkurcz}}$

$$C_1 = p_{\text{rozkurcz}} e^{\frac{T}{RC}} \quad (12)$$

Tak więc przebieg ciśnienia w fazie rozkurczowej można opisać zależnością:

$$P(t) = p_{rozkurcz} e^{-\frac{(t+T)}{RC}} \quad (13)$$

Rozwiązanie równania 9 dla fazy skurczowej:

Równanie różniczkowe opisujące przebieg ciśnienia w fazie skurczowej jest determinowany funkcją objętości przetłaczanej krwi i przedstawia się następująco:

$$P(t) + CR \frac{dP(t)}{dt} = (R + r)A_1 \sin(\omega t) + CRrA_1 \omega \cos(\omega t) \quad (14)$$

Do rozwiązania analitycznego rozwiązania zastosowano metodę uzmienniania stałej $C_1 = C_1(t)$, które po odpowiednich wyliczeniach sprowadza się do postaci całkowitej:

$$C_1(x) = \frac{1}{CR} \left[B_1 \int e^{\frac{t}{RC}} \sin(\omega t) dt + B_2 \int e^{\frac{t}{RC}} \cos(\omega t) dt \right] \quad (15)$$

gdzie:

$$B_1 = (R + r)A_1, B_2 = CRrA_1 \omega$$

Rozwiązania obu całek przedstawiają się następująco:

$$\int e^{\frac{t}{RC}} \sin(\omega t) dt = D_1 \cdot \left[-D_2 e^{\frac{t}{RC}} \cos(\omega t) + D_3 e^{\frac{t}{RC}} \sin(\omega t) \right] + C_2 \quad (16)$$

$$\int e^{\frac{t}{RC}} \cos(\omega t) dt = D_1 \cdot \left[D_2 e^{\frac{t}{RC}} \sin(\omega t) + D_3 e^{\frac{t}{RC}} \cos(\omega t) \right] + C_3 \quad (17)$$

Stałe D_1 , D_2 oraz D_3 są równe odpowiednio:

$$D_1 = \frac{(\omega RC)^2}{(\omega RC)^2 + 1}$$

$$D_2 = \frac{1}{\omega}$$

$$D_3 = \frac{1}{\omega^2 RC}$$

Po uwzględnieniu powyższych zależności w równaniu [równanie na C1] oraz podstawieniu do równania [windkessel_ rozkurcz], funkcja przebiegu ciśnienia ma postać:

$$P(x) = \frac{D_1}{CR} [B_1 \cdot [-D_2 \cos(\omega t) + D_3 \sin(\omega t)] + B_2 \cdot [D_2 \sin(\omega t) + D_3 \cos(\omega t)]] + C_4 \quad (18)$$

Co można sprowadzić do postaci:

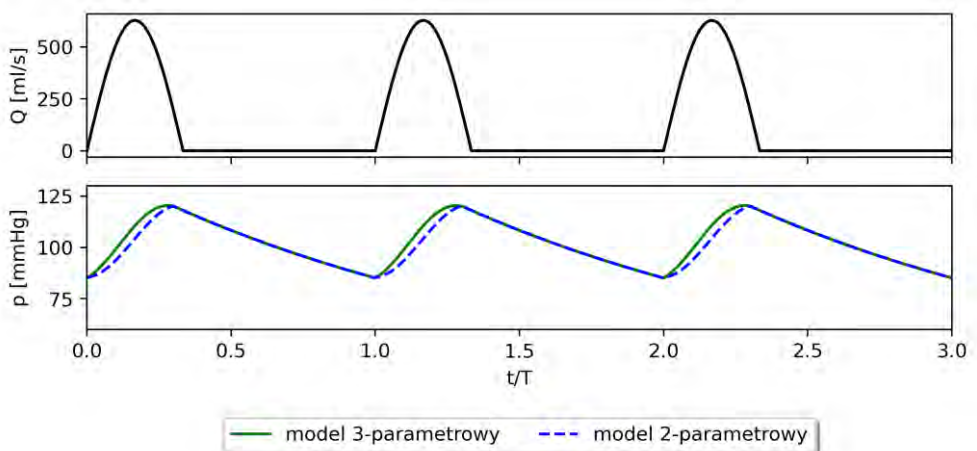
$$P(x) = \frac{D_1}{CR} [(B_2 D_3 - B_1 D_2) \cos(\omega t) + (B_1 D_3 + B_2 D_2) \sin(\omega t)] + C_4 \quad (19)$$

Stałą C_4 można wyznaczyć z wykorzystaniem warunku początkowego $P(0) = p_{rozkurcz}$, który mówi, że na początku fazy skurczowej krew ma wartość ciśnienia rozkurczowego. Tak więc:

$$C_4 = p_{rozkurcz} + \frac{D_1}{CR} (B_1 D_2 - B_2 D_3) \quad (20)$$

4. PORÓWNANIE ROZWIĄZAŃ I Dyskusja Wyników

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg wyznaczonych funkcji ciśnienia dla modelu 2-parametrowego i 3-parametrowego. Wyraźnie można zauważyć wpływ nieuwzględnienia charakterystycznego oporu naczyniowego na pulsację ciśnienia – w fazie skurczowej, opór charakterystyczny powoduje szybsze zwiększenie ciśnienia krwi. Uwzględnienie tej wielkości pozwala na precyzyjniejsze wyznaczenie pulsacji ciśnienia, co jest istotne szczególnie w przypadku modelowania naczyń tętniczych i aortalnych. Można to wyjaśnić, analizując przepływ krwi w trakcie poszczególnych cykli pracy serca.



Rys. 4. Porównanie pulsacji ciśnienia dla dwóch rozpatrywanych modeli

W fazie rozkurczowej, przy zamkniętych zastawkach, opór naczyniowy charakterystyczny nie odgrywa dużej roli, w związku z czym przepływ jest determinowany oporem naczyniowym i pojemnością naczyniową, które są uwzględnione w obu modelach. Podczas fazy rozkurczowej, ciśnienie rośnie na skutek oporu zastawek – czego odzwierciedlenie można zobaczyć tylko w przypadku zastosowaniu wariantu 3-parametrowego. Powstała różnica ciśnień jest proporcjonalna do prędkości przepływu i zgodnie z danymi przedstawionymi przez Lighthilla [Lighthill 1978] ma kształt zbliżony do danych pomiarowych. Wartość ciśnienia skurczowego jest również proporcjonalna do wielkości oporu naczyniowego. Model 3-parametrowy daje pełny obraz powstałej pulsacji, tak więc uwzględnienie oporu charakterystycznego jest konieczne w przypadku modelowania przepływu w tętnicach – parametr ten ma mniejsze znaczenie w przypadku przepływu w żyłach, gdzie wpływ zastawek jest pomijalny, a większe znaczenie ma opór naczyniowy i bezwładność przepływu.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono propozycje analitycznego wyznaczenia funkcji pulsacji ciśnienia w tętnicy. Nieuwzględnienie oporu charakterystycznego, szczególnie w przypadku analizy przepływu krwi w dużych tętnicach aortalnych i szyjnych (znajdujących się relatywnie blisko serca) może doprowadzić to niedoszacowania ciśnienia skurczowego. W rezultacie prędkość przepływu, a więc i profil prędkości determinujący rozkład naprężeń na ściankach może mieć zawyżone wartości. Może to doprowadzić do błędnej interpretacji wyników, gdzie istotne jest wyznaczenie obszarów lokalnych spadków naprężeń stycznych na ściance. Model 2-parametrowy wykazuje taką samą skuteczność jak model 3-parametrowy w czasie fazy rozkurczowej ze względu na to, że zamknięte zastawki aortalne nie wpływają w tej części cyklu na przepływ.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Rubenstein D., Frame D., 2022, *Biofluid Mechanics (An Introduction to Fluid Mechanics, Macrocirculation, and Microcirculation)* 3. wydanie, Academic Press, Elsevier
2. Lighthill MJ, 1978, *Waves in fluids*, Cambridge University Press, Nowy Jork

Artykuły w czasopismach

1. Wetterer E, Kenner T, 1968, *Grundlagen der Dynamik des Arterienpulses*, Springer, Berlin

2. Frank O, 1899, Die Grundform des arteriellen Pulses, Z Biol nr 37, s. 483–526
3. Wetterer E., 1954, Flow and pressure in the arterial system, their hemodynamic relationship, and the principles of their measurement, Minn Med nr 37, s.77–86
4. Westerhof N., Lankhaar J., Berend E., 2009, The arterial Windkessel, Med Biol Eng Comput nr 47, s. 131–141
5. Segers P., Stergiopulos N., Westerhof N., 2000, Quantification of the contribution of cardiac and arterial remodeling to hypertension, Hypertension nr 36, s. 760–765

ANALYTICAL DETERMINATION OF THE ARTERIAL PRESSURE PULSATION FUNCTION

Abstract

The paper presents a procedure for the analytical solution of the pressure pulsation equation implementing the Windkessel hydraulic analogy concept. The analytical solution for two model concepts: two-parameter and three-parameter was determined. The results show that taking into account the vascular characteristic impedance better reflects the pressure pulsations in the systolic phase, which is very important for arterial blood flow modeling.

Keywords: blood flow, Windkessel, pressure pulsation, analytical functions

Natalia LEWANDOWSKA*
Przemysław GRZYMISŁAWSKI*

WYKORZYSTANIE TECHNOLOGII UCZENIA MASZYNOWEGO W PROCESIE WYTWARZANIA I WYKORZYSTANIA ENERGII

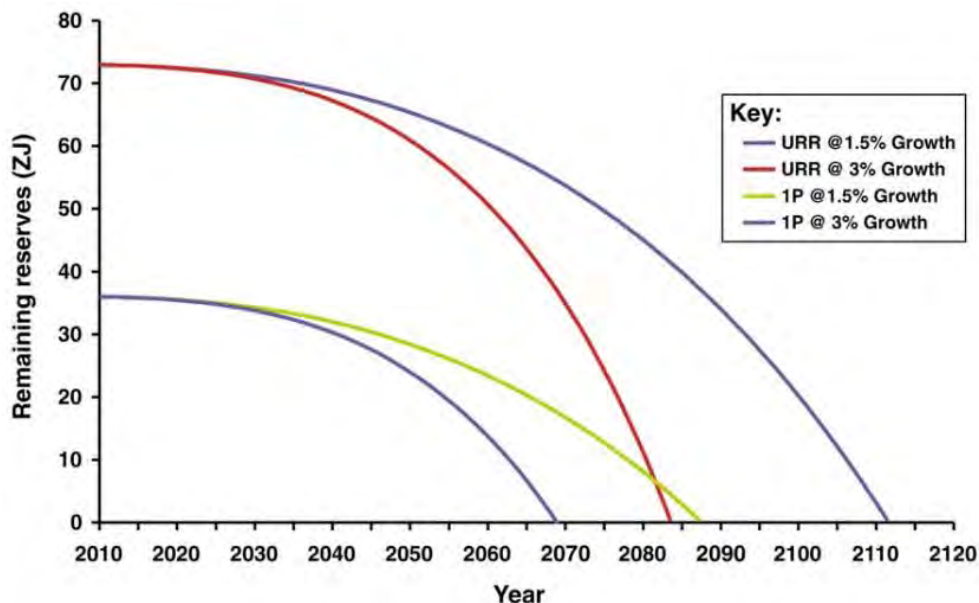
W artykule zwrócono uwagę na możliwości stosowania metod uczenia maszynowego i uczenia głębokiego w kontekście wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych. W związku ze stale rosnącymi normami emisji spalin oraz niebezpieczeństwa wyczerpania złóż paliw kopalnych niezbędne jest zaraz większe wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych, które w dużej mierze są nieprzewidywalne. Dokonano przeglądu wykorzystywanych modeli predykcyjnych z wykorzystaniem uczenia maszynowego. Określono, które metody dają najlepsze wyniki w zależności od zastosowanej skali czasowej - dzień, tydzień, miesiąc. Podkreślono także konieczność stosowania magazynów energii w infrastrukturze krytycznej, do której można zaliczyć wytwarzanie energii.

Słowa kluczowe: uczenie maszynowe, energetyka odnawialna, prognozowanie pogody, farmy wiatrowe

1. WPROWADZENIE

Współczesna energetyka konwencjonalna stoi przed potężnymi wyzwaniami. Z jednej strony ograniczana jest coraz surowszymi normami powodującymi konieczność stosowania coraz bardziej kosztownych systemów oczyszczania spalin [Decyzja..., 30.11.2021], z drugiej - dążenie do neutralności klimatycznej [Rozporządzenie..., 30.06.2021]. Uwzględnić należy także spadek dostępności paliw kopalnych, oraz fakt, że w niedalekiej przyszłości ich zapasy zostaną wyczerpane [Hook i Tang 2013, Stephens et al. 2010] (rys. 1.).

* Instytut Energetyki Ciepłej, Politechnika Poznańska.



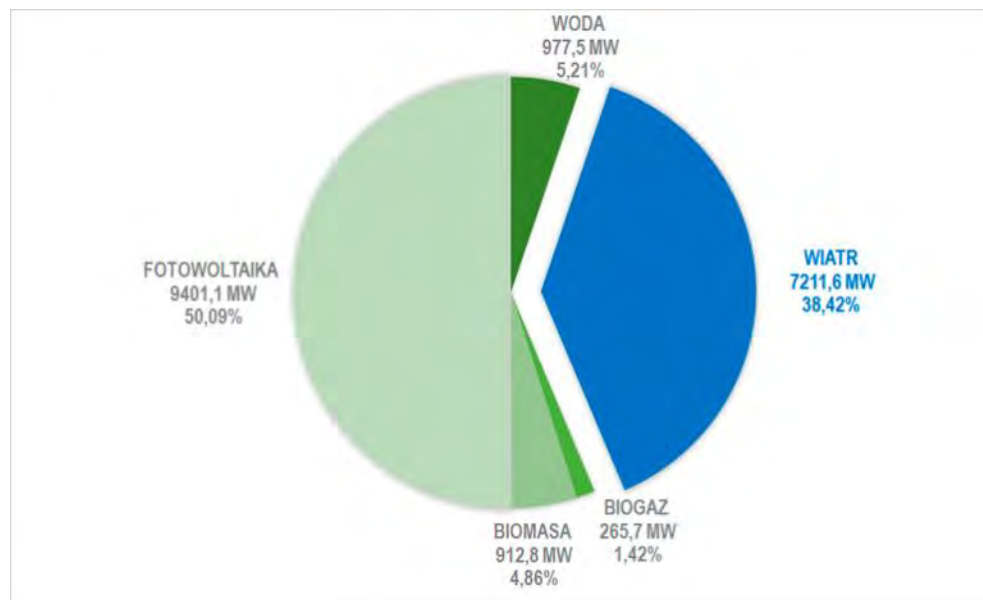
Rys. 1. Przewidywane wskaźniki globalnego wyczerpywania się paliw kopalnych [Stephens et al. 2010]

W związku z tym coraz częściej wykorzystywane są obiekty wytwarzające energię w oparciu o źródła odnawialne, takie jak wiatr, słońce czy woda. Pomijając energetykę wodną, słońce oraz wiatr cechują się naturą silnie stochastyczną. Dlatego też prognozowanie pogody jest zadaniem tak trudnym i złożonym.

Kompleksowe przewidywanie pogody, z uwzględnieniem parametrów takich jak temperatura, ciśnienie, kierunek i siła wiatru, poziom nasłonecznienia, wymaga ogromnych zasobów sprzętowych i pokrywa przedział czasowy rzędu kilkudziesięciu godzin w przód. W przypadku przewidywania produkcji energii elektrycznej z farm wiatrowych ilość danych wejściowych jak i wyjściowych może być zdecydowanie ograniczona - są to odpowiednio prędkość wiatru, ilość produkowanej energii i krok czasowy. Bazując na danych historycznych z jednej turbiny lub całej farmy, możliwe jest wykorzystanie uczenia maszynowego do predykcji parametrów - ilości produkowanej energii.

2. PRODUKCJA ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z FARM WIATROWYCH

Obecnie w Polsce moc zainstalowana w farmach wiatrowych wynosi około 7,2 GW. Jest to drugie pod względem mocy zainstalowanej źródło energii odnawialnej w kraju i ustępuje fotowoltaice, której moc zainstalowana wynosi około 9,4 GW (rys. 2).



Rys. 2. Moc zainstalowana w odnawialnych źródłach energii w Polsce na koniec marca 2022 r. [Rynek Elektryczny]

Ilość farm wiatrowych w Polsce na koniec roku 2020 wynosiła 1239, z czego 1111 farm posiadało moc zainstalowaną na poziomie poniżej 10MW. Farmy wiatrowe o największej mocy zainstalowanej przedstawione zostały w tabeli 1.

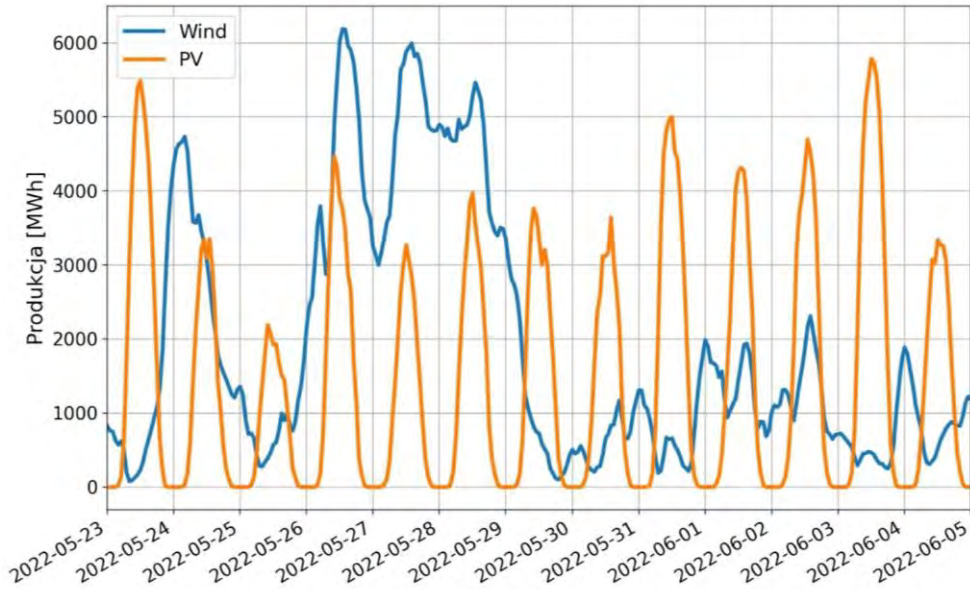
Tabela 1

Największe farmy wiatrowe w Polsce

Nazwa	Województwo	Moc zainstalowana	Rok powstania
Potęgowo	pomorskie	219 MW	2020
Margonin	wielkopolskie	120 MW	2009
Banie	zachodniopomorskie	106 MW	2016
Marszewo	zachodniopomorskie	100 MW	2013
Lotnisko	pomorskie	94,5 MW	2015
Karścino	zachodniopomorskie	90 MW	2009

Analizując tabelę 1 zauważyć można, że największe farmy wiatrowe umiejscowione są w regionach o największej wietrzności.

Bazując na danych systemowych udostępnianych na stronie Polskich Sieci Elektroenergetycznych [Polskie Sieci Elektroenergetyczne] możliwe jest wykorzystanie danych historycznych produkcji energii. Przykładowe dane produkcji energii w okresie od 23-05-2022 do 05-06-2022 zostały przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Poziom produkcji energii elektrycznej z wiatru i słońca w okresie od 23-05-2022 do 05-06-2022 [Polskie Sieci Elektroenergetyczne]

Analizując rys. 3 można zauważyć, że produkcja energii elektrycznej z wykorzystaniem turbin wiatrowych jest niezależna od pory dnia. Ponadto chwilowa ilość produkowanej energii może być większa niż z wykorzystaniem paneli fotowoltaicznych. Jest to związane z możliwością ustawienia turbiny wiatrowej zgodnie z kierunkiem wiatru, co pozwala maksymalizować wykorzystanie energii zawartej w wietrze, pamiętając o limitach związanych z prawem Betz'a. Maksymalną moc możliwą do uzyskania można przedstawić równaniem:

$$P_{max} = 0.593 \cdot \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad (1)$$

gdzie:

ρ - gęstość

S - pole zataczane przez łopaty turbiny

v_1 - prędkość wiatru przed turbiną

Zdaniem autorów, dłuższy czas reakcji turbiny wiatrowej na zmieniające się warunki pogodowe - prędkość wiatru - jest zaletą, ponieważ daje więcej czasu na odpowiedź z systemu elektronergetycznego, a więc większe możliwości np. ograniczenia produkcji w elektrowniach ciepłych.

3. UCZENIE MASZYNOWE

3.1. Koncepcja uczenia maszynowego

Uczenie maszynowe, jako dział nauki, zaczął się rozwijać w latach 50. XX wieku. To wtedy naukowcy rozpoczęto prace nad sztucznymi neuronami, które miały odwzorowywać neurony, a łącząc sztuczne neurony, zaczęły powstawać sztuczne sieci neuronowe.

Ideą uczenia maszynowego jest wykorzystanie algorytmów, które „uczą się” analizując duże zbiory danych. Tak powstały algorytm buduje model matematyczny, który następnie ułatwia podejmowanie decyzji, ale co kluczowe, nie jest to algorytm zaprogramowany przez człowieka, tylko przez maszynę.

Obecnie uczenie maszynowe jest bardzo rozwinięte i mamy z nim styczność codziennie, jako przykład niech posłuży profilowanie użytkowników internetu na podstawie odwiedzanych stron internetowych, klikniętych linków, oglądanych ofert sprzedaży, co pozwala dostawcom sugerować reklamy. Można jednak uczenie maszynowe wykorzystywać w innych celach, takich jak na przykład przewidywanie pogody, dzięki czemu możliwe jest lepsze zarządzanie infrastrukturą krytyczną, jaką są producenci energii elektrycznej.

3.2. Metody uczenia maszynowego

Obecnie stosowanych jest wiele metod uczenia maszynowego, takich jak:

- wnioskowanie funkcji logicznej z przykładów,
- uczenie drzew decyzyjnych,
- uczenie Bayesowskie,
- uczenie z przykładów,
- uczenie się zbioru reguł,
- uczenie analityczne,
- połączenie uczenia indukcyjnego i analitycznego,
- uczenie przez wzmacnianie.

Każda z powyższych metod ma swoje zalety oraz ograniczenia. Dlatego bardzo istotne jest, aby przed rozpoczęciem procesu uczenia dokonać analizy i wybrać metodę, która będzie odpowiadać danemu zagadnieniu.

Kolejnym ważnym elementem w uczeniu maszynowym jest przygotowanie zbioru danych, no podstawie których system będzie się uczył. Nieprawidłowo przygotowane dane mogą generować błędy. Także odpowiednia ilość danych ma znaczenie – zbyt mało danych wejściowych nie pozwoli uzyskać wiarygodnych wyników, zbyt duża ilość z kolei spowoduje zbyt przeszywnienie układu, co można wytłumaczyć jako duże ograniczenie, brak kontrolowanej „wolności” w uczeniu się.

4. PREDYKCJA KRÓTKOTERMINOWA PRĘDKOŚCI WIATRU

4.1. Wpływ warunków pogodowych na produkcję energii z farm wiatrowych

Predykcje mocy wygenerowanej przez farmę wiatrową dotyczą zwykle określenia przewidywanej prędkości wiatru w okresie krótkoterminowym tj. od kilku godzin do maksymalnie 2-3 dni. Wynika to z faktu, że operacje w systemach elektroenergetycznych są realizowane zwykle w tych ramach czasowych przez zaplanowane wcześniej harmonogramy ustalające pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną. Dobra predykcja krótkoterminowa prędkości wiatru pozwala na redukcję ryzyka związanego z niedoborem mocy oraz pozwala na lepsze zarządzanie systemem farm wiatrowych poprzez lepszą integrację systemu farm wiatrowych do istniejących systemów elektroenergetycznych bazujących na energetyce konwencjonalnej. Ze względu na swoją silnie stochastyczną naturę, precyzyjne przewidywanie prędkości wiatru jest zagadnieniem bardzo trudnym, wymagającym użycia danych historycznych. Obecnie najczęściej stosuje się dwie grupy metod: modele fizyczne oraz metody statystyczne oraz uczenia maszynowego. Te drugie wykorzystują jako wejście dane historyczne, tak więc ich skuteczność mocno zależy od jakości tych danych, które są determinowane m.in. rozdzielczością pomiarów, miejscem wykonywania pomiarów oraz precyzją. Minimalizacja błędu predykcji pełni kluczowe znaczenie w procesie wdrożenia farm wiatrowych do ustalaniu harmonogramu obciążenia sieci elektroenergetycznej.

4.2. Przegląd stosowanych metod – metody statystyczne i uczenie maszynowe

Danymi wyjściowymi w modelach predykcji wiatru, w zależności od podejścia, może być wynikowa prędkość i kierunek wiatru. Większość metod jest jednak dostosowywana do zastosowania energetycznego, tak więc często w tego typu rozwiązaniach przewidywana jest od razu moc, jaką zdolna jest wygenerować turbina lub farma wiatrowa w określonym przedziale czasu. Metody te opierają się na koncepcji „czarnej skrzynki” (ang. “black box”), gdzie bez ingerowania w fizykę zjawiska generowane jest wyjście na podstawie wejścia w postaci pomiarów mocy lub prędkości

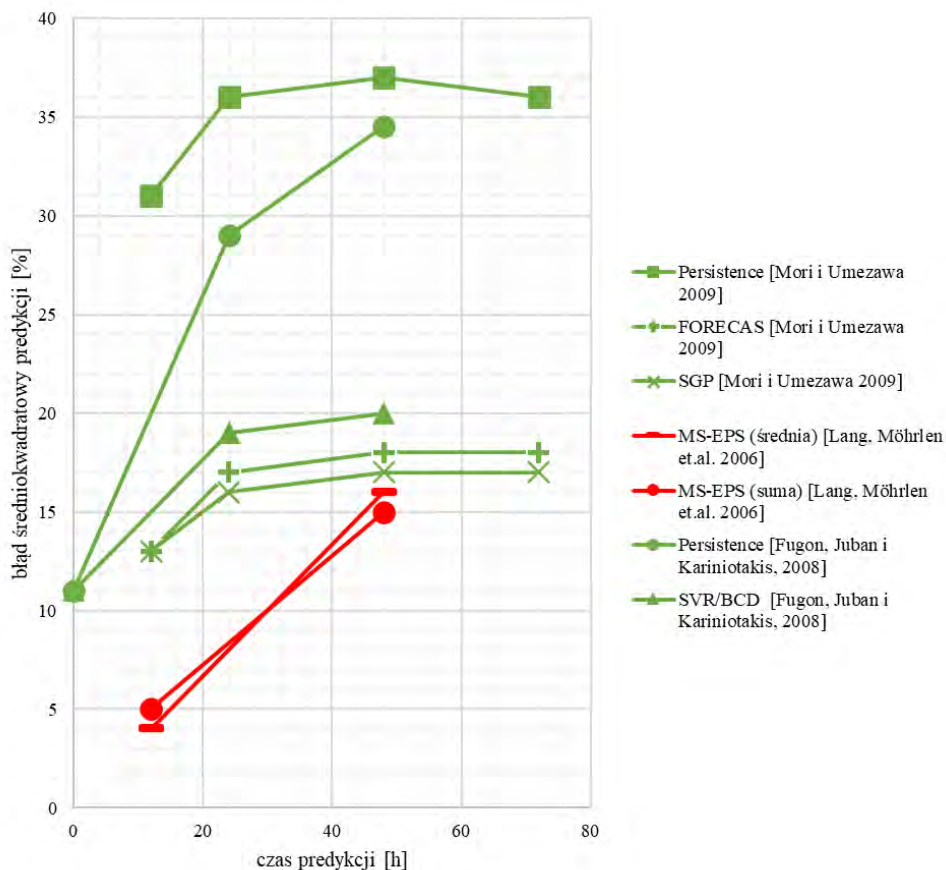
wiatru. Modele służące do przewidywania mocy generowanej przez turbiny wiatrowe można podzielić na dwie zasadnicze grupy. Pierwszą z nich są metody bazujące na analizie statystycznej danych historycznych i na podstawie tej analizy ekstrapolują one prędkość wiatru na określony okres czasu. W drugiej grupie metod dane historyczne są wykorzystywane jako wejście do modelu, który przewiduje moc farmy wiatrowej bazując na metodach uczenia maszynowego i sztucznej inteligencji. Istnieją również metody hybrydowe wykorzystujące oba te podejścia. Istnieją również metody fizyczne, które opierają się na równaniach przepływowych w celu przewidzenia ruchów atmosferycznych. Są one wykorzystywane głównie w stacjach meteorologicznych by przewidzieć pogodę na dużym obszarze i pozwalają znaleźć pełen rozkład prędkości. Metody tego typu jednak nie znajdują one szerszego wykorzystania w kontekście farm wiatrowych ze względu na małą rozdzielczość danych. Mogą być one jednak wykorzystywane jako uzupełnienie w modelach hybrydowych.

W podejściu statystycznym analizowana jest duża ilość danych, a procesy meteorologiczne nie są jednoznacznie reprezentowane. Określany jest związek między historyczną produkcją energii a prędkością wiatru (np. na podstawie pomiaru mocy z konkretnej turbiny wiatrowej), a następnie związek ten wykorzystuje się do prognozowania przyszłej produkcji energii. W przeciwieństwie do metod fizycznych metody statystyczne wymagają tylko jednego kroku, aby przekształcić zmienne wejściowe na przewidywaną moc wyjściową lub prędkość wiatru. Na ogół opracowuje się statystyczną zależność między prognozą pogody lub przewidywaniami a potencjalną produkcją energii elektrycznej przez farmę wiatrową. Najczęściej wykorzystywane metody statystyczne zawierają metody autoregresywne (AR - ang. autoregressive), średniej ruchomej (MA - ang. moving average) i metody autoregresywnej zintegrowanej średniej ruchomej (ARIMA - ang. autoregressive integrated moving average model). Badania prowadzone przez Torresę et. al [Torres et.al 2005] wykazały, że wykorzystanie metody ARIMA pozwala na 20% redukcję błędu porównując z metodami MA i AR w przypadku prognozowania średniej godzinowej prędkości wiatru dla 10-godzinnego zakresu czasu.

Innym podejściem wyznaczania przewidywanej mocy elektrycznej jest zastosowanie uczenia maszynowego poprzez np. wykorzystywanie sztucznych sieci neuronowych (ANN - artificial neural networks) opisanych w poprzednim rozdziale. Ich skuteczność jest bezpośrednio związana z ilością danych wejściowych, ze względu na to, że sieci neuronowe uczą się danych zachowań i na podstawie zdobytego "doświadczenia" próbują przewidzieć przyszłe zachowanie. Najczęściej używanymi w badaniach typami ANN są standardowe sieci wielowarstwowe (MLP - ang. multi-layer perception) [Hervás-Martínez et.al. 2009] oraz rekurencyjne sieci neuronowe (SRN - simultaneous recurrent neural network) [Barbounis i Theocharis, 2007]. Ciekawe podejście do predykcji mocy generowanej przez turbinę zostało zastosowane w [Ramirez-Rosado et.al 2009], gdzie model bazujący na siecach neuronowych został połączony z charakterystyką mocy danej turbiny, co znacznie polepszyło osiągi turbiny. Najnowszym podejściem w wykorzystaniu uczenia maszynowego w przewidywaniu mocy turbiny jest wykorzystanie drzewek decyzyjnych (ang. decision tree).

Badania przeprowadzone w [Mori i Umezawa 2009] wykazały, że skuteczność modelu może być większa, jeżeli dane wejściowe zostaną uzupełnione o informacje na temat wartości ciśnienia atmosferycznego i wilgotności powietrza w rozpatrywanym przedziale czasu. Dobre rezultaty można też uzyskać stosując ze sobą modele będą kombinacją metod statystycznych oraz sieci neuronowych [Jursa 2007]. Ważnym aspektem również determinującym skuteczność danego podejścia jest miejsce wykonywania pomiarów, na podstawie których dokonuje się predykcji. Badania przeprowadzone w [Lang et.al. 2006] polegały na sprawdzeniu, jak miejsce pomiaru prędkości wiatru wpływa na skuteczność jego predykcji w danym obszarze. W tym celu wykorzystano dane historyczne ze stacji meteorologicznych z określonego obszaru geograficznego. Do predykcji użyty został model uczenia maszynowego nazywany ELM (ang. Extreme Machine Learning) który używa metod losowej dystrybucji danych wejściowych ulepszony algorytmem AdaBoost, który ocenia "przydatność" danych wejściowych za pomocą przypisania do nich odpowiednich wartości wag. Błąd predykcji w badanym modelu różnił się w zależności od tego, z której stacji meteorologicznej zostały użyte dane wejściowe dla modeli i wahały się między 6% a 15%. Kluczowym aspektem w tym przypadku okazał się odpowiedni dobór punktów pomiarowych. Najlepsze rezultaty można uzyskać umieszczając punkt pomiarowy bezpośrednio w miejscu występowania turbiny wiatrowej. Lepsze rezultaty można również uzyskać, jeżeli przy modelowaniu uwzględną się również nie tylko wartość prędkości wiatru, ale też i jego kierunek. Pierwszy raz to podejście zastosowano w [Goh, Popovic i Mandic 2004] - co również pozwoliło zmniejszyć błąd predykcji.

Głównym wskaźnikiem do oceny skuteczności poszczególnych modeli jest błąd predykcji RSME. Na rysunku 4 przedstawiono średnią wartość błędów generowanych przez omówione wcześniej modele w zależności od przewidywanego czasu. Kolorem zielonym oznaczono krzywą predykcji mocy, a kolorem czerwonym oznaczono krzywe predykcji prędkości wiatru. Można wyraźnie zauważyć, że modele hybrydowe cechują się mniejszym błędem predykcji, a więc i wyższą skutecznością. Ważną też obserwacją jest to, że im dłuższy jest przewidywany czas, tym większa jest wartość błędów predykcji. Modele, zarówno oparte na statystyce, jak i na uczeniu maszynowym (oraz hybrydowe) wykazują wysoką skuteczność w przypadku prognoz krótkoterminowych (do 24h), natomiast powyżej tego czasu, błędy predykcji nadal przekraczają wartość 15%. Tak więc wyzwaniem nadal pozostaje stworzenie modelu, który wykazuje małe błędy dla czasu dłuższego niż 24h. W pracy Fugona [Fugon, Juban and Kariniotakis 2008] dodatkowo stwierdzono, że w przypadku połączenia kilku modeli statystycznych do prognozowania z jednodniowym wyprzedzeniem błąd prognozy maleje.



Rys. 4. Porównanie skuteczności predykcji prędkości wiatru (kolor czerwony) i mocy wytwarzanej turbiny (kolor zielony)

5. PODSUMOWANIE

Obecnie stosowane modele do predykcji mocy wytwarzanej przez turbinę wiatrową wykazują wysoką skuteczność dla bardzo krótkoterminowych okresów przewidywanego czasu: do 24h. Obecnie większość badań w zakresie wykorzystania uczenia maszynowego dotyczy ulepszenia modeli w taki sposób, by były one również skuteczne w przypadku kilkudniowej predykcji. Największą skutecznością cechują się modele hybrydowe bazujące zarówno na sieciach neuronowych (lub drzewkach decyzyjnych) jak i na metodach statystycznych lub fizycznych, czyli modele hybrydowe.

Kluczową wersją determinującą skuteczność modelu jest jakość danych historycznych wykorzystywanych przez algorytmy: zarówno miejsce wykonywania pomiarów jak i dodatkowe czynniki mające wpływ na pogodę, takie jak wilgotność powietrza, ciśnienie atmosferyczne itp. Najbardziej obecnie optymalnym rozwiązaniem jest wykorzystanie pomiarów wykonanych bezpośrednio na turbinie wiatrowej. Uwzględnienie większego obszaru przewidywania może rzutować zwiększeniem błędu predykcji, dlatego prognozowanie dla całego systemu farm wiatrowych powinno być oparte o dane dotyczące ściśle lokalizacji, w której ta farma się znajduje. Najnowsze badania prowadzone w omawianym zakresie nie skupiają się tylko i wyłącznie na wyznaczeniu prędkości wiatru, ale też jego kierunku, co pozwala na skuteczniejsze oszacowanie mocy wytwarzanej przez turbinę wiatrową.

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. Torres JL, García A, de Blas M, de Francisco A., 2005, Forecast of hourly averages wind speed with ARMA models in Navarre, *Solar Energy*, nr 79, s. 65-77
2. Hervás-Martínez C, Gutiérrez PA, Fernández JC, Salcedo-Sanz S, PortillaFigueras A, Pérez-Bellido A and et al., 2009, Hyperbolic tangent basis function neural networks training by hybrid evolutionary programming for accurate short-term wind speed prediction, *Proceedings of the 9th international conference on intelligent systems design and applications*, Pisa, Włochy.
3. Barbounis TG, Theocharis JB., 2007, Locally recurrent neural networks for wind speed prediction using spatial correlation. *Information Sciences*, nr 177(24), 5775-97.
4. Ramirez-Rosado IJ, Alfredo Fernandez-Jimenez L, Monteiro C, Sousa J, Bessa R., 2009, Comparison of two new short-term wind-power forecasting systems, *Renewable Energy*, nr 34, 1848-54
5. Mori H and Umezawa Y., 2009, Application of NB tree to selection of meteorological variables in wind speed prediction, *Proceedings of the IEEE transmission & distribution conference & exposition, Asia and Pacific*
6. Jursa R., 2007, Wind power prediction with different artificial intelligence models, *Proceedings of the European wind energy conference, EWEC2007, Milan, Włochy*
7. Lang S, Möhrlein J, Jørgensen J, O'Gallachóir BP and McKeogh E., 2006, Application of a multi-scheme ensemble prediction system for wind power forecasting in Ireland and comparison with validation results from Denmark and Germany, *Proceedings of the European wind energy conference, EWEC2006, Athens, Grecja*
8. Goh SL, Popovic DH, Mandic DP. Complex-valued estimation of wind profile and wind power, 2004, *Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean electrotechnical conference, MELECON 2004, Dubrovnik, Chorwacja*
9. Fugon L, Juban J, and Kariniotakis G., 2008, Data mining for wind power forecasting, *Proceeding of the European wind energy conference, EWEC2008, Bruksela, Belgia*
10. Hook M, Tang X., 2013, Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change - a review, *Energy Policy*, nr 52, s. 797-809

11. Stephens E., Ross I. L., Mussgnug J. H., Wagner L. D., Borowitzka M. A., Posten C., Kruse O., Hankamer B., Future prospects of microalgal biofuel production system, Trends in Plant Science, Październik 2010, tom 15, nr 10, s. 554-564

Rozporządzenia

1. Decyzja wykonawcza komisji (UE) 2021/2326 z dnia 30 listopada 2021 r. ustanawiająca konkluzje dotyczące najlepszych dostępnych technik (BAT) w odniesieniu do dużych obiektów energetycznego spalania zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE
2. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119 z dnia 30 czerwca 2021 r. w sprawie ustanowienia ram na potrzeby osiągnięcia neutralności klimatycznej i zmiany rozporządzeń (WE) nr 401/2009 i (UE) 2018/1999 (Europejskie prawo o klimacie)

Strony internetowe

1. Rynek Elektryczny, <https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-farm-wiatrowych-w-polsce/> (dostęp 10-06-2022)
2. Polskie Sieci Elektroenergetyczne, <https://www.pse.pl/dane-systemowe> (dostęp 10-06-2022)

THE USE OF MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES IN THE PROCESS OF ENERGY PRODUCTION AND USE

Abstract

This paper highlights the applicability of machine learning and deep learning methods in the context of renewable energy generation. In connection with constantly increasing emission standards and the danger of depletion of fossil fuel deposits, it is necessary to increase the use of energy from renewable sources, which are largely unpredictable. A review of prediction models using machine learning was carried out. It was determined which methods give the best results depending on the time scale used - day, week, month. It also emphasized the need for energy storage in critical infrastructure, which can include power generation.

Keywords: machine learning, renewable energy, weather forecasting, wind farms

Andrzej LIS*

Robert RECZKOWSKI**

Mirosław WNOROWSKI***

ZROZUMIEĆ STRATEGICZNE UWARUNKOWANIA FUNKCJONOWANIA I ROZWOJU INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ: ANALIZA STRATEGICZNA, KONEKTOGRAFIA, WARGAMING

Celem artykułu jest określenie możliwości zastosowania wybranych metod analitycznych na potrzeby analiz ukierunkowanych na zidentyfikowanie strategicznych uwarunkowań funkcjonowania i rozwoju infrastruktury krytycznej. Operacjonalizując przyjęty cel artykułu sformułowano następujące pytania badawcze: (1) Jakie metody analizy strategicznej mogą zostać zaadaptowane na potrzeby identyfikowania strategicznych uwarunkowań funkcjonowania i rozwoju infrastruktury krytycznej? (2) W jaki sposób wykorzystać potencjał konektografii w tym zakresie? (3) Jakie są możliwości zastosowania gier decyzyjnych (wargaming) do wsparcia analizy uwarunkowań infrastruktury krytycznej i jej bezpieczeństwa?

Słowa kluczowe: infrastruktura krytyczna, analiza strategiczna, konektografia, wargaming

1. WPROWADZENIE

Infrastruktura krytyczna obejmuje „systemy oraz wchodzące w ich skład powiązane ze sobą funkcjonalnie obiekty, w tym obiekty budowlane, urządzenia, instalacje, usługi kluczowe dla bezpieczeństwa państwa i jego obywateli oraz służące zapewnieniu sprawnego funkcjonowania organów administracji publicznej, a także instytucji i przedsiębiorców” [Ustawa o zarządzaniu kryzysowym, 26.04.2007, art. 3, ppkt. 2].

* Wydział Nauk Ekonomicznych i Zarządzania, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu; Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych w Bydgoszczy.

** Wydział Nauk o Polityce i Bezpieczeństwie, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu; Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych w Bydgoszczy.

*** Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych w Bydgoszczy.

W skład infrastruktury krytycznej zaliczane są systemy: zaopatrzenia w energię, surowce energetyczne i paliwa; łączności; sieci teleinformatycznych; finansowe; zaopatrzenia w żywność; zaopatrzenia w wodę; ochrony zdrowia; transportowe; ratownicze; zapewniające ciągłość działania administracji publicznej; produkcji, składowania, przechowywania i stosowania substancji chemicznych i promieniotwórczych, w tym rurociągi substancji niebezpiecznych [Ustawa o zarządzaniu kryzysowym, 26.04.2007, art. 3, ppkt. 2]. Infrastruktura krytyczna stanowi jeden z kluczowych elementów decydujących o odporności państwa na zagrożenia bezpieczeństwa narodowego. Stąd też ochrona infrastruktury krytycznej znalazła się, obok systemu rezerw strategicznych, wśród priorytetów i kierunków interwencji określonych w „Strategii Rozwoju Systemu Bezpieczeństwa Narodowego Rzeczypospolitej Polskiej 2022”, przyjętej w 2013 roku. Narzędziem wdrażania powyższej strategii jest „Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej”, który ma na celu zwiększenie poziomu bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej. Jednym z celów pośrednich programu jest „zdobycie określonego poziomu świadomości, wiedzy i kompetencji [...] w zakresie znaczenia IK dla sprawnego funkcjonowania państwa oraz sposobów i metod jej ochrony” [Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej, 2020, s. 8]. Bezpośrednio z tego celu wynika rola środowiska naukowego w zakresie wzmacniania bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej poprzez dostarczanie analiz, wiedzy i eksperckiego wglądu oraz opracowywanie metod, technik i narzędzi analitycznych wspierających procesy zarządzania infrastrukturą krytyczną [Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej, 2020, s. 25].

W „Strategii Bezpieczeństwa Narodowego Rzeczypospolitej Polskiej”, przyjętej przez Prezydenta RP 12 maja 2020 roku, zdefiniowany został cel strategiczny odnoszący się bezpośrednio do odporności państwa i obrony powszechnej. Jeden z celów szczegółowych operacjonalizujących powyższy cel strategiczny uwzględnia wdrożenie „model[u] ochrony infrastruktury krytycznej, polegając[ego] na zapewnieniu jej ciągłości działania oraz świadczonych przez nią usług” [Strategia Bezpieczeństwa Narodowego RP, 2020, s. 16]. Warto zwrócić uwagę również na inny z celów szczegółowych odwołujący się bezpośrednio do koncepcji odporności państwa (resilience), który zakłada zwiększenie odporności na „zagrożenia przede wszystkim w zakresie: ciągłości rządzenia i funkcjonowania państwa, skutecznych dostaw energii, niekontrolowanego przepływu osób i relokacji ludności, gromadzenia, ochrony oraz zagospodarowania zasobów żywności i wody, zdolności do postępowania w przypadku wystąpienia zdarzeń o charakterze masowym, odpornych sieci telekomunikacyjnych i systemów teleinformatycznych, systemów informowania i ostrzegania ludności oraz wydolnego systemu transportowego” [Strategia Bezpieczeństwa Narodowego RP, 2020, s. 16].

Zarządzanie strategiczne systemami infrastruktury krytycznej oraz rozwijanie jej potencjału wymaga stałego analizowania uwarunkowań, zarówno tych o charakterze egzo- jak i endogennym. Do realizacji tego zadania niezbędne jest posiadanie odpowiedniego instrumentarium analitycznego obejmującego metody, techniki i narzędzia. Przegląd dostępnej literatury przedmiotu wskazuje na występowanie „luki w wiedzy”

w tym zakresie, co stanowi przyczynek do dalszych badań i dociekań naukowych. Mając na uwadze choćby częściowe wypełnienie zidentyfikowanej luki badawczej, celem artykułu jest określenie możliwości zastosowania wybranych metod analitycznych na potrzeby analiz ukierunkowanych na zidentyfikowanie strategicznych uwarunkowań funkcjonowania i rozwoju infrastruktury krytycznej. Operacjonalizując przyjęty cel artykułu sformułowano następujące pytania badawcze: (1) Jakie metody analizy strategicznej mogą zostać zaadaptowane na potrzeby identyfikowania strategicznych uwarunkowań funkcjonowania i rozwoju infrastruktury krytycznej? (2) W jaki sposób wykorzystać potencjał konektografii w tym zakresie? (3) Jakie są możliwości zastosowania gier decyzyjnych (wargaming) do wsparcia analizy uwarunkowań infrastruktury krytycznej i jej bezpieczeństwa?

W procesie badawczym zastosowano metodę narracyjnego przeglądu literatury. Doboru publikacji do analizy dokonano w sposób celowy, z uwzględnieniem publikacji z zakresu metodyki analiz strategicznych, konektografii i wargamingu. Ponadto w analizie uwzględniono wnioski i doświadczenia autorów wynikające z udziału (obserwacja czynna, uczestnicząca) w projekcie analiz środowiska bezpieczeństwa i środowiska operacyjnego pk. Nowe Urządzenie Polskie NUP 2X35, koordynowanego przez Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych [Mokrzycki, Reczkowski i Cieśla 2020, Mokrzycki i Lis 2020].

2. ANALIZA STRATEGICZNA

2.1. Metody segmentacji otoczenia

Spośród metod analizy strategicznej wykorzystywanych do segmentacji otoczenia, na potrzeby identyfikowania strategicznych uwarunkowań funkcjonowania i rozwoju infrastruktury krytycznej szczególną uwagę należy zwrócić na analizy PEST, PMESII i ASCOPE. Analiza PEST służąca do identyfikowania i kategoryzowania czynników otoczenia z uwzględnieniem wymiarów (segmentów): politycznego (Political), ekonomicznego (Economic), społeczno-kulturowego (Socio-cultural) i technologicznego (Technological) należy do klasycznych, a jednocześnie najczęściej stosowanych metod analizy makrootoczenia (środowiska bezpieczeństwa). Spotykane są również analizy uwzględniające dodatkowo wymiary: środowiska naturalnego (Environmental), prawny (Legal) czy militarny (Military). W wariacie podstawowym, w poszczególnych segmentach otoczenia z pomocą ekspertów identyfikowane są czynniki (siły) wpływające na bieżącą i przyszłą sytuację analizowanego obiektu. Jednostką analizy (unit of analysis) może być zarówno infrastruktura krytyczna, jak i każdy z wchodzących w jej skład systemów. Uzupełnieniem analizy jakościowej mogą być implikacje dla badanego obiektu (jednostki analizy) wynikające z oddziaływania zidentyfikowanych czynników (Tabela 1). W wariacie rozszerzonym, z wykorzystaniem metod

heurystycznych np. metody delfickiej, określane są siłą wpływu oraz prawdopodobieństwo dla każdego z czynników, z uwzględnieniem trzech trendów (wzrost, stabilizacja, spadek). Siła wpływu oceniana jest w skali od „-5” (bardzo negatywny wpływ) do „+5” (bardzo pozytywny wpływ). „0” oznacza brak wpływu. Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia czynnika wyrażana jest w ułamku dziesiętnym (np. 0,2; 0,3; 0,5 itp.) i zawiera się w przedziale od „0” (zdarzenie niemożliwe) do „1” (zdarzenie pewne). Suma prawdopodobieństw dla trzech trendów tego samego czynnika musi równać się „1”. Identyfikacja siły wpływu poszczególnych czynników otoczenia na badany obiekt oraz prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych trendów stanowi punkt wyjścia do budowania scenariuszy stanów otoczenia [Gierszewska, Romanowska 1997, s. 265-266]. Przykładowy sposób wypełnienia kwestionariusza uwzględniającego ocenę ilościową przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 1

Kwestionariusz analizy PEST (ocena jakościowa)

Wymiar (segment) otoczenia	Czynniki	Implikacje
Polityczny		
Ekonomiczny		
Spółeczny		
Technologiczny		

Tabela 2

Przykład wypełnienia kwestionariusza analizy PEST (ocena ilościowa)

Wymiar (segment) otoczenia	Kierunek trendu	Siła wpływu [od -5 do +5]	Prawdopodobieństwo [od 0 do 1]
Czynnik otoczenia	wzrost	+5	0,4
	stabilizacja	+1	0,4
	regres	-4	0,2

Kolejną z metod segmentacji otoczenia stanowi kategoryzacja PMESII, uwzględniająca wymiary (segmenty): polityczny (Political), militarny (Military), ekonomiczny

(Economic), społeczny (Social), informacyjny (Information) i infrastrukturalny (Infrastructure). Analiza PMESII jest szeroko rozpowszechniona w organizacjach wojskowych [AJP-01(E) 2017, JP-3.0 2017, JP-5.0 2020)]. Analiza PMESII może być, podobnie jak PEST, zastosowana do jakościowej (Tabela 1) i/lub ilościowej (Tabela 2) oceny wpływu czynników otoczenia na badaną jednostkę analizy (tu: infrastrukturę krytyczną lub jeden z jej systemów). Mając na uwadze fakt, że infrastruktura stanowi jeden z wymiarów (segmentów) otoczenia w analizie PMESII, w Tabeli 3 zaproponowano zmodyfikowaną wersję analizy, uwzględniającą poszczególne systemy wchodzące w skład infrastruktury krytycznej jako jednostki analizy. W przyjętym wariantcie identyfikację czynników w poszczególnych segmentach otoczenia połączono z jakościową oceną, kategoryzującą segmenty otoczenia pod kątem szans, zagrożeń lub wyzwań dla analizowanych systemów wchodzących w skład infrastruktury krytycznej.

Tabela 3

Analiza PMESII (wersja zmodyfikowana na potrzeby oceny otoczenia systemów infrastruktury krytycznej)

Wymiary	Systemy infrastruktury krytycznej									
	Energia	Łączność	Finanse	Żywność	Woda	Zdrowie	Transport	Ratownictwo	Administracja	Substancje chemiczne
P										
M										
E										
S										
I										

CZERWONY - zagrożenia

ŻÓŁTY - wyzwania

ZIELONY - szanse

Inną metodą segmentacji otoczenia jest analiza ASCOPE, uwzględniająca: obszary (Areas), struktury (Structures), zdolności (Capabilities), organizacje (Organizations), ludzi (People) i wydarzenia (Events) [CIMIC Handbook 2020]. Analiza ASCOPE może zostać wykorzystana do zidentyfikowania czynników otoczenia w poszczególnych kategoriach wpływających na funkcjonowanie i rozwój infrastruktury krytycznej oraz wynikających stąd implikacji – podobnie jak w przypadku analizy PEST (Tabela

1) lub do zidentyfikowania w poszczególnych kategoriach szans, zagrożeń i wyzwań – tak jak w przypadku analizy PMESII – Tabela 3.

2.2. Metody scenariuszowe

Metody scenariuszowe służą do prognozowania zmian nieciągłych w otoczeniu i opierają się na założeniu, że ponieważ nie można przewidzieć co się wydarzy w przyszłości, należy opracować możliwe scenariusze rozwoju sytuacji. Metody scenariuszowe uwzględniają cztery rodzaje scenariuszy [Gierszewska, Romanowska 1997, s. 56-79]:

- scenariusze stanów otoczenia,
- scenariusze procesów w otoczeniu,
- scenariusze możliwych zdarzeń,
- scenariusze symulacyjne.

Scenariusze stanów otoczenia stanowią rozwinięcie metod segmentacji otoczenia np. analizy PEST. Na podstawie wyników oceny ilościowej prognozowanej siły oddziaływania poszczególnych czynników w otoczeniu i prawdopodobieństwa wystąpienia konkretnego trendu (wzrost, stabilizacja, regres), przeprowadzonej z wykorzystaniem metod heurystycznych np. sesji delfickiej (por. Tabela 2) opracowywane są trzy scenariusze:

- optymistyczny – uwzględniający czynniki o największym pozytywnym wpływie,
- pesymistyczny – uwzględniający czynniki o największym negatywnym wpływie,
- najbardziej prawdopodobny – uwzględniający czynniki o największym prawdopodobieństwie wystąpienia.

Analiza stanów poszczególnych wymiarów (segmentów) otoczenia (PEST) uwzględnia:

- analizę burzliwości otoczenia – poziom burzliwości wzrasta wraz ze wzrostem rozpiętości pomiędzy scenariuszem optymistycznym i pesymistycznym,
- analizę jednorodności otoczenia – poziom jednorodności spada wraz ze wzrostem rozpiętości scenariusza najbardziej prawdopodobnego,
- identyfikację wymiarów (segmentów) otoczenia, w których przeważają szanse i zagrożenia.

Uzupełnieniem analizy stanów otoczenia jest analiza procesów w otoczeniu, która uwzględnia dwa rodzaje procesów:

- procesy kluczowe (o dużej sile wpływu na badany obiekt i wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia),
- procesy zmian nieciągłych (o dużej sile wpływu na badany obiekt i niskim prawdopodobieństwie wystąpienia).

Scenariusze możliwych zdarzeń służą do identyfikowania zdarzeń, które w przyszłości mogą wpływać na badany obiekt (jednostkę analizy) oraz siły i charakteru tego oddziaływania. Istotne jest również rozpoznanie przyczyn tych zdarzeń oraz ocena możliwości przeciwdziałania ich skutkom (w przypadku zagrożeń) lub wykorzystania potencjalnych szans. Scenariusze możliwych zdarzeń niekorzystnych są metodą stosowaną w zarządzaniu infrastrukturą krytyczną m.in. w Holandii, Irlandii, Kanadzie, Niemczech, Szwecji i Wielkiej Brytanii [Wiśniewski, Ostrowska 2016, s. 113]. Scenariusze możliwych zdarzeń niekorzystnych były uwzględnione w pierwszym „Narodowym Programie Ochrony Infrastruktury Krytycznej” wprowadzonym w 2013 r. Zgodnie z zapisami powyższego dokumentu proces oceny ryzyka z wykorzystaniem scenariuszy możliwych zdarzeń niekorzystnych obejmował następujące czynności [Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej, 2013, s. 26]:

- identyfikację zagrożeń i opracowanie scenariuszy,
- ocenę prawdopodobieństwa zmaterializowania się poszczególnych scenariuszy,
- ocenę podatności infrastruktury krytycznej i jej środków ochrony na oddziaływanie zagrożeń,
- ocenę skutków zmaterializowania się poszczególnych scenariuszy,
- ocenę ryzyka zakłócenia infrastruktury krytycznej, uwzględniającą powyższe czynniki (prawdopodobieństwo, podatność i skutki).

Scenariusze symulacyjne wykorzystywane są do antycypacyjnej oceny wybranych wariantów działania, z uwzględnieniem oddziaływania otoczenia.

2.3. Analiza SWOT

Analiza SWOT jest metodą, która może być wykorzystywana zarówno do analizy systemu i jego otoczenia (w wariacie podstawowym) jak i do wsparcia procesu formułowania strategii (w wariacie rozszerzonym). W analizie uwzględniane są zarówno uwarunkowania zewnętrzne, mające swoje źródło w otoczeniu systemu, uwzględniające szanse (Opportunities) i zagrożenia (Threats), jak i uwarunkowania wewnątrzorganizacyjne, to jest: mocne strony (Strengths) i słabe strony (Weaknesses). Szanse i zagrożenia w otoczeniu identyfikowane są na podstawie wyników przeprowadzonych wcześniej analiz z wykorzystaniem metod segmentacji otoczenia lub metod scenariuszowych. Identyfikacja silnych i słabych stron może być dokonana na podstawie wyników analizy kluczowych czynników sukcesu [szerzej: Gierszewska, Romanowska 1997, s. 146-156]. W wariacie rozszerzonym (analiza SWOT/TOWS), badane są powiązania pomiędzy zidentyfikowanymi mocnymi i słabymi stronami organizacji oraz szansami i zagrożeniami w otoczeniu. Celem analizy jest ustalenie [Gierszewska, Romanowska 1997, s. 206-219, s. 57-63]:

- czy zidentyfikowane mocne strony umożliwią wykorzystanie szans/przezwyciężenie zagrożeń w otoczeniu?
- czy zidentyfikowane słabe strony ograniczą możliwości wykorzystania szans/wzmocnią negatywny wpływ zagrożeń?

- czy szanse w otoczeniu wzmocnią mocne strony/zmitygują słabe strony?
- czy zagrożenia w otoczeniu osłabią mocne strony/spotęgują słabe strony?

Na podstawie wyników analizy SWOT/TOWS, z uwzględnieniem ogólnych wytycznych dla tej metody [Gierszewska, Romanowska 1997, s. 213-214, The NATO Alternative Analysis Handbook 2017, s. 60], mogą zostać sformułowane rekomendacje w zakresie wyboru wariantu funkcjonowania i rozwoju infrastruktury krytycznej spośród czterech alternatywnych strategii:

- strategia ofensywna (maxi-maxi) – ukierunkowana na rozwój infrastruktury krytycznej (lub wybranego systemu wchodzącego w jej skład) poprzez wykorzystanie szans w otoczeniu i mocnych stron,
- strategia defensywna (maxi-mini) – ukierunkowana na mitygowanie wpływu zagrożeń pochodzących z otoczenia na funkcjonowanie infrastruktury krytycznej (systemu) poprzez wykorzystanie jej mocnych stron,
- strategia wzmacniania (mini-maxi) – ukierunkowana na monitorowanie i wykorzystywanie szans w otoczeniu przy jednoczesnym wzmacnianiu wewnętrznych słabych stron infrastruktury krytycznej (systemu) utrudniających eksploatację zidentyfikowanych szans,
- strategia przetrwania (mini-mini) – ukierunkowana na przetrwanie infrastruktury krytycznej (systemu) poprzez mitygowanie negatywnego wpływu zagrożeń w otoczeniu i wewnętrznych słabych stron.

Tabela 3

Warianty strategiczne w analizie SWOT/TOWS

	Mocne strony (S)	Słabe strony (W)
Szanse (O)	strategia ofensywna (maxi-maxi)	strategia wzmacniania (mini-maxi)
Zagrożenia (T)	strategia defensywna (maxi-mini)	strategia przetrwania (mini-mini)

3. KONEKTOGRAFIA

3.1. Istota konektografii

Twórcą terminu konektografia jest Parag Khanna, indyjsko-amerykański badacz geopolityki i procesów globalizacji. W swojej książce pt. *Connectography: Mapping*

the Future of Global Civilization Khanna przedstawia innowacyjne spojrzenie na ewoluujące relacje gospodarcze i polityczne. Poprzez połączenie anglojęzycznych słów „connectivity” i „geography” w „connectography” Khanna proponuje innowacyjny sposób patrzenia na otaczającą rzeczywistość poprzez pryzmat połączeń. W jego ocenie globalna infrastruktura przekształca system światowy przenosząc akcenty z podziałów na połączenia i z narodów na węzły. Co ciekawe, infrastrukturę porównuje z układem nerwowym, który łączy wszystkie części ciała. Warto zwrócić również uwagę na jego odniesienie do map, gdzie stwierdza, że mapy ciągle się zmieniają i jednocześnie przypominają nam, że w mapach nie ma nic trwałego. Jednym z ciekawych argumentów w tym względzie jest to, że współczesne mapy muszą przede wszystkim odzwierciedlać demografię, ekonomię, ekologię i inżynierię. Co więcej, Khanna twierdzi, że nowa generacja map i modeli to coś więcej niż zbiór ładnych cyfrowych przewodników. Powinny być one centralnym punktem syntezy nauk o środowisku, polityki, ekonomii, kultury, technologii i socjologii, w których bada się głównie powiązania, a nie podziały. Kończąc swoją argumentację zwraca uwagę na jeszcze jeden ważny szczegół, że żyjemy w świecie złożoności, w którym połączenia między miastami poprzez komunikację globalną, transport czy linie zaopatrzeniowe są o wiele ważniejsze niż granice geograficzne i państwowe [Khanna 2016].

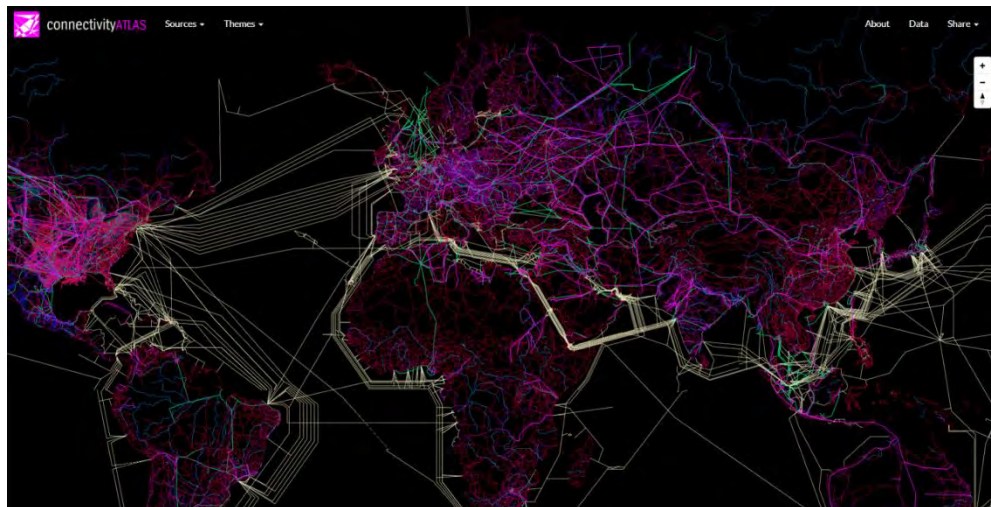
Powyższe rozważania Khanny można również odnieść do bardzo ważnego w ostatnim okresie czasu aspektu środowiska bezpieczeństwa, jakim jest szeroko rozumiana urbanizacja wraz z towarzyszącymi jej różnorodnymi procesami, w tym rozwojem infrastruktury kluczowej dla rozwoju gospodarczego i bezpieczeństwa państwa. Dlaczego jest to dzisiaj tak ważne? Ponieważ mega-geografia znana nam lepiej jako globalizacja, tworzy dzisiaj zupełnie nową przestrzeń dla planowania, handlu czy migracji. W tej nowej rzeczywistości, kluczową rolę odgrywają właśnie miasta, zwłaszcza wielkie.

UN-Habitat* szacuje, że w miastach żyje już ponad 50% światowej populacji, która wytwarza 70% globalnego PKB, konsumuje 60% energii i produkuje 70% odpadów. Miasta takie jak Tokio, czy Paryż wytwarzają około 180 mln dolarów PKB na kilometr kwadratowy. Co ciekawe, miasta wciąż zajmują niespełna 3% powierzchni naszej planety [World Cities Report, 2020]. Nie mniej jednak wielkie miasta odgrywają coraz większą rolę jako ośrodki aktywizujące i zmieniające nie tylko ich najbliższe zaplecze, lecz całe regiony i kraje. Z tego też powodu wielu dzisiaj zadaje sobie pytanie: czym jest urbanizacja†, na czym polega jej fenomen? I nie chodzi tylko o prostą konstatację,

* UN-Habitat - agenda ONZ zajmująca się kwestiami urbanizacji i osiedli ludzkich, w tym promocją zrównoważonego rozwoju ośrodków miejskich. Powstała w 1978 roku w następstwie pierwszej konferencji ds. habitatu. Początkowo działała jako UN Centre for Human Settlements. Przyt. aut.

† Urbanizacja jest procesem, dzięki któremu dany teren i jego mieszkańcy nabierają charakteru miejskiego. Odnosi się to zarówno do przemian samego miejsca (miasta), jak i ludzi. Urbanizacja oznacza, że coraz większa część społeczeństwa staje się mieszkańcami miast i w miarę jak to się dzieje, zwiększa się liczebność populacji miast, ich obszar i wzrasta ich

że ludzie częściej osiedlają się w miastach, ale o gruntowną analizę czegoś, co właśnie Khanna określił mianem konektografii – a więc infrastruktury, linii komunikacyjnych, linii wymiany informacji i towarów, usług pomiędzy jednostkami i instytucjami coraz częściej zlokalizowanymi w obrębie dużych aglomeracji (patrz rys. 1). Tu bardzo istotny jest również wątek technologiczny, ponieważ połączenia internetowe, rurociągi energetyczne i sieci elektryczne, które łączą regiony ściślej niż kiedykolwiek wcześniej pozwalają ludziom prowadzić coraz bardziej „połączone” życie. Co więcej, świat państw narodowych staje się coraz bardziej światem węzłów i węzłów tranzytowych, podążającym w prostym kierunku ku tzw. „globalnej cywilizacji sieciowej”.



Rys. 1. Konektografia świata[‡]
Źródło: Connectivity Atlas, 2022

Można założyć, że w coraz bardziej połączonym świecie, im silniejsze są więzi, które nas łączą, tym bardziej ograniczone i przewidywalne stają się nasze działania. Powyższej logice wymyka się jednak przypadek rosyjskiej agresji przeciwko Ukrainie, bowiem Rosja zdecydowała się na zbrojną napaść na swojego sąsiada pomimo silnych powiązań z resztą Europy. A może właśnie mając na uwadze silne powiązania gospodarcze i energetyczne uzależnienie państw Unii Europejskiej od rosyjskich węglowodorów, Kreml uznał, że będzie to istotny czynnik determinujący postawę państw

wpływ na tereny wiejskie – zarówno na ich wygląd, jak i na życie ich mieszkańców. Coraz więcej obszarów krajobrazu wiejskiego przekształca się w krajobraz miejski, a ludzie zaczynają żyć w środowisku, które pod względem fizycznym i społecznym ma charakter miejski [Szymańska 2022].

[‡] Rysunek ilustruje sieci powiązań pomiędzy miastami bez uwzględnienia geografii. Przedmiotowe sieci dotyczą: dróg lądowych (kolor czerwony), dróg kolejowych (kolor fioletowy), dróg morskich (kolor biały), linii energetycznych (gazociągi i ropociągi – kolor zielony) oraz dróg wodnych śródlądowych (kolor niebieski). Przyp. aut.

europiejskich wobec agresji na Ukrainę? W tym względzie Khanna argumentuje, że nawet jeśli współzależność może wykorzystywać broń w postaci sankcji finansowych, gospodarczych, cyberataków czy zakłóceń w łańcuchu dostaw, to należy mieć świadomość, że eskalacja zbrojna jest dziś znacznie bardziej kosztowna dla obu stron niż miało to miejsce w przeszłości, ponieważ natychmiast szkodzi np. własnym przedsiębiorstwom powiązanim z podmiotami w innych państwach [Khanna 2016]. Czyż nie dzieje się dzisiaj tak z firmami rosyjskimi, które ponoszą dotkliwie konsekwencje politycznych działań Kremla w Ukrainie?

Abstrahując od tego przykładu, według niektórych prognoz eksperckich, w przyszłości celem wojen bardziej niż zajęcie terytorium może stać się uzyskanie dostępu do kluczowych zasobów naturalnych, takich jak np. woda czy złoża metali ziem rzadkich, tak istotnych obecnie z punktu widzenia rozwoju nowych technologii [Mokrzycki, Reczkowski i Cieśla 2020, s. 17-22]. Co więcej, z punktu widzenia bezpieczeństwa, obok terytorium rośnie znaczenie złożonych łańcuchów dostaw. W konsekwencji powstające zakłócenia (np. przerwanie łańcuchów dostaw) powodują o wiele większe perturbacje dla państw, a w szczególności dla ich gospodarek, niż nam się do tej pory wydawało. Dlatego też szacuje się, że w przyszłości siły zbrojne będą coraz częściej rozmieszczane w celu obrony/ochrony tych łańcuchów dostaw. Przejawem takiej logiki jest na przykład budowa przez Chiny pierwszej zagranicznej bazy wojskowej w Dżibuti.

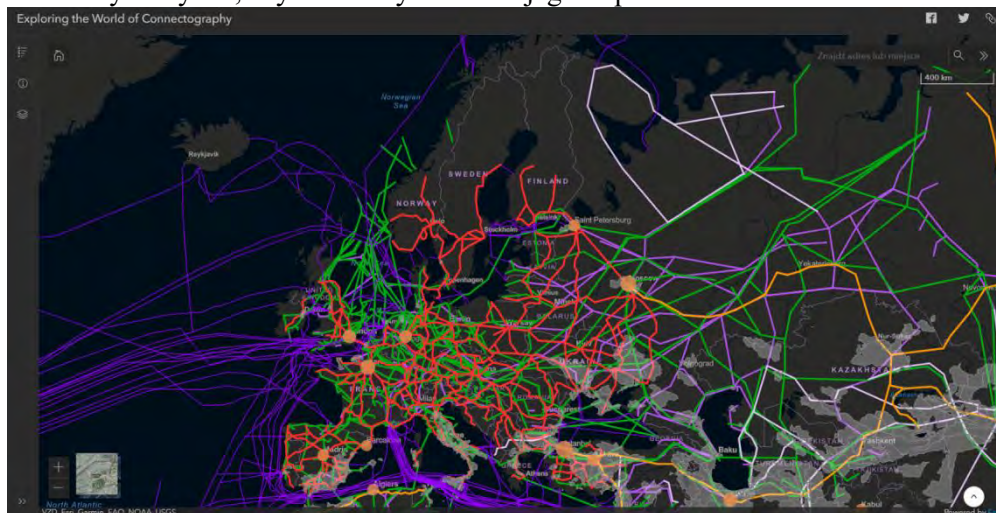
3.2. Infrastruktura krytyczna: wykorzystanie konektografii w identyfikacji wzajemnych powiązań jej elementów i ich podatności na zakłócenia

Powyższe wskazuje, że infrastruktura krytyczna państwa w swej istocie jest złożonym systemem powiązanych ze sobą elementów. Niektóre z nich są tak krytyczne, jak chociażby transport, energia elektryczna, instytucje finansowe, systemy telekomunikacyjne czy systemy odpowiedzialne za dostawy ropy i gazu, że gdyby zostały ubezwłasnowolnione lub zniszczone, cały region, a nawet całe państwo, mógłby ulec destabilizacji. Dlatego funkcjonowanie tych systemów ma zasadnicze znaczenie dla bezpieczeństwa i dalszego rozwoju gospodarczego kraju. Jak zauważają eksperci z amerykańskiego Sandia National Laboratories, kiedyś te systemy były dość niezależne. Jednakże wraz z rozwojem nowych technologii (w szczególności komputerowych i informacyjnych), z każdym dniem stają się one coraz bardziej połączone i zautomatyzowane, a zmiany technologiczne umożliwiające im funkcjonowanie w ten sposób stworzyły nowe luki w zabezpieczeniach [Robinson, Woodard i Varnado 1998]. W tym względzie to, co w przeszłości byłoby odosobnioną awarią spowodowaną błędem ludzkim, celowym działaniem osób trzecich, awarią sprzętu lub pogodą, może dziś poprzez technologiczną lawinę (tzw. efekt domina) spowodować zakłócenia na niewyobrażalną skalę.

Istotne jest również to, że wśród niektórych elementów infrastruktury (na przykład sieci telekomunikacyjnych i finansowych) stopień współzależności jest szczególnie

silny i – co równie ważne – wszystkie te systemy zależą od siebie w różnym stopniu. Dlatego nie powinno się postrzegać tych złożonych systemów operacyjnych jako niezależnych podmiotów, gdyż razem tworzą one rozległy, żywotny i wrażliwy system systemów. Oczywiście same elementy infrastruktury są podatne na zakłócenia fizyczne i elektroniczne, a dysfunkcja w jednym z nich może powodować konsekwencje w innych systemach. Niektóre z tych konsekwencji są nad wyraz oczywiste, ale inne są bardzo subtelne np. utrata zaufania publicznego, która powoduje, że ludzie nie są w stanie skontaktować się z lekarzem, zadzwonić po pomoc czy skontaktować się z członkami rodziny w nagłych wypadkach lub skorzystać z bankomatu, aby podjąć gotówkę. Co więcej, prognozuje się, że częstotliwość takich incydentów i dotkliwość ich wpływu będzie rosła, chociażby z powodu np. luk w zabezpieczeniach, które istnieją w infrastrukturze teleinformatycznej. Już w 1997 roku John Deutch, ówczesny dyrektor CIA, uznał działania w cyberprzestrzeni za drugie najpoważniejsze zagrożenie dla bezpieczeństwa narodowego USA, tuż za bronią masowego rażenia w rękach terrorystów [Robinson, Woodard i Varnado 1998].

Analizy środowiska bezpieczeństwa prowadzone w formacie krajowym (np. NUP 2X35) czy sojuszniczym (Strategic Foresight Analysis – SFA, NATO Warfighting Capstone Concept – NWCC) wskazują na dwa zasadnicze problemy w odniesieniu do zagadnienia: jak najlepiej chronić krytyczne elementy infrastruktury państwa? Pierwszym z nich jest potrzeba zdefiniowania ról sektora publicznego i prywatnego oraz opracowania planu podziału odpowiedzialności między nimi. Drugim jest potrzeba zrozumienia, w jaki sposób funkcjonuje każdy system w infrastrukturze i jak wpływa na inne systemy tak, aby można było zbadać jego współzależności.



Rys. 2. Konektografia sieci transportowej, gazociągowej, ropociągowej oraz telekomunikacyjnej w Europie

Źródło: Harvard University, 2022

O ile w przypadku pierwszego zagadnienia nie powinno to stanowić większego problemu, gdyż wystarczy chociażby wprowadzić odpowiednie regulacje prawne, to w przypadku drugiego z wyżej wymienianych aspektów sprawa już nie jest tak prosta. W pewnym sensie w poszukiwaniu odpowiedzi na nie może przyjść z pomocą właśnie konektografia, która pozwala zmapować kluczowe systemy i wskazać zależności między nimi (patrz rys. 2). Przegląd możliwych podejść analitycznych do tego problemu wskazuje, że konektografia może m.in. w wymierny sposób wspierać tzw. ocenę opartą na konsekwencjach w celu zrozumienia i zarządzania krytycznymi elementami systemów. Ocena ta zaczyna się od zdefiniowania potencjalnych konsekwencji zakłóceń, a następnie od wskazania krytycznych węzłów-elementów. Na koniec przedstawia się mechanizmy ochrony tych węzłów i związane z nimi koszty ochrony. Ponadto takie podejście może również wskazać kluczowe węzły, których ochrona/obrona powinna stanowić priorytet dla struktur odpowiedzialnych za bezpieczeństwo państwa. Istotne jest również to, że konektografia może być przydatna do udzielenia odpowiedzi na pytanie dlaczego np. Chiny czy Rosja tak bardzo interesują się danym obszarem i co szczególnie ważne się tam znajduje w kontekście globalnej infrastruktury, że akurat tam państwa te budują np. bazy wojskowe czy dążą do uzyskania kontroli nad danym obszarem.

Powyższe tylko potwierdza, że zabezpieczenie infrastruktury krytycznej zależy od zrozumienia relacji pomiędzy jej elementami, a dzięki konektografii możliwe jest przeprowadzenie takiej analizy w sposób systemowy. W ocenie autorów, oczywistym wyborem do symulacji relacji między elementami infrastruktury są np. modele komputerowe. Jest to podejście, w którym interakcje są modelowane indywidualnie przez programy komputerowe zwane inteligentnymi agentami, po jednym dla każdej interakcji, w którym każdy program reprezentuje jakiś podmiot, np. bank, przedsiębiorstwo energetyczne czy firmę telekomunikacyjną. Można również wykorzystywać inne metody np. strategiczne gry decyzyjne (ang. wargaming – vide podrozdział 4) chociażby do weryfikacji planu zarządzania kryzysowego, jak również jego synchronizacji z planami nadrzędnym i podrzędnym.

W ocenie autorów, w ciągu najbliższych 10-15 lat ochrona infrastruktury krytycznej musi być traktowana jako kluczowy aspekt bezpieczeństwa narodowego. Istnieje zatem pilna i rosnąca potrzeba wypracowania metod wykrywania i ostrzegania przed zbliżającymi się atakami i awariami systemu w krytycznych elementach infrastruktury krajowej. Jeśli nie rozwiniemy takich wskazań i zdolności ostrzegania, będziemy ciągle narażeni na poważne zakłócenia w funkcjonowaniu naszej infrastruktury, a w konsekwencji również sprawnego wypełniania funkcji przez państwo.

4. WARGAMING

4.1. Istota i przeznaczenie gier wojennych

Gry wojenne (ang. *wargaming*) pojawiły się w siłach zbrojnych w XIX w., kiedy to gra *Neues Kriegsspiel* (klasyczna gra typu CoA (ang. Course of Action), zwykle dwu lub trójstronna ze sztywnym lub półsztywnym orzekaniem) autorstwa Georga Vinturnisa została wprowadzona do programu nauczania taktyki dla oficerów armii pruskiej. Umożliwiała ona symulowanie przemieszczenia jednostek, zasilania logistycznego oraz ich niszczenia. W XX w. w czasie Wielkich Wojen gry wojenne były wykorzystywane zarówno do weryfikacji planów operacyjnych jak i do szkolenia. Po II wojnie światowej, w latach zimnej wojny, wykorzystywane były do symulowania potencjalnego konfliktu pomiędzy mocarstwami. Uwzględniając definicje gier wojennych zawarte w literaturze przedmiotu można stwierdzić, że gra wojenna to [Wnorowski 2022]:

- symulacja operacji wojskowej, w ramach której zaangażowane są dwie lub większa liczba stron, która posiada określone reguły i umożliwia reprezentację określonej sytuacji [JP-1 2013/2017],

- symulacja działań, w której bieg wydarzeń wpływa na podejmowane decyzje, a podejmowane decyzje wpływają na bieg zdarzeń [Perla 1990],

- symulacja, której celem jest zebranie wniosków i doświadczeń z procesu podejmowania decyzji lub uzyskanie informacji niezbędnych do podjęcia decyzji [McHugh 1966],

- technika podejmowania decyzji zapewniająca, przy stosunkowo niskich kosztach, ustrukturyzowane, lecz rozumowo dowolne i dopuszczające bezpieczną porażkę środowisko, które pozwala odkryć, co działa (wygrana/sukces), a co nie działa (przegrana/porażka) [UK MoD, 2017],

- środowisko do podejmowania decyzji w oparciu o niepełne dane [Herman, Frost i Kurz 2009],

- narzędzie do tworzenia analiz, wniosków i spostrzeżeń [Carter, Steinbruner i Zrakat (red.) 1987],

Uwzględniając powyższe można stwierdzić, że przedmiotem gier wojennych jest podejmowanie decyzji w środowisku wygenerowanym na potrzeby gry w celu weryfikacji uprzednio podjętych decyzji (np. weryfikacji planów), badanie możliwych konsekwencji tych decyzji lub generowanie danych do podjęcia decyzji. W praktyce działania podmiotów zajmujących się zagadnieniami bezpieczeństwa narodowego i obronności wykorzystywane są różne rodzaje gier wojennych, w tym m.in. [Wnorowski 2022]:

- gry seminaryjne (ang. *seminar game*),

- gry macierzowe (ang. *matrix game*),

- symulacje działań, gry moderowane (ang. *course of action wargame* – CoA),

- gry indukcyjne (ang. *inductive game*),
- gry dedukcyjne (ang. *deductive game*);
- gry oceny przełomowych technologii (ang. *Disruptive Technology Assessment Game – DTAG*),
- gry oceny rozwijanych koncepcji (ang. *Concept Development Assessment Game – CDAG*).

Dziedziną nauki, która zajmuje się podejmowaniem decyzji jest teoria gier. Jej przedmiotem jest m.in. poszukiwanie optymalnej strategii dla każdego z graczy w konkretnej sytuacji decyzyjnej. Teoria gier umożliwia analizę matematyczną decyzji podejmowanych przez graczy oraz ich potencjalnych skutków w oparciu o zdefiniowane modele. Jest to konstrukt szczególnie wykorzystywany w naukach ekonomicznych oraz naukach o polityce, gdzie dobór właściwych strategii może przełożyć się bezpośrednio na osiągnięte zyski lub stopień akceptacji i poparcia społecznego. Poniżej na rysunku przedstawiona została *tabela wypłat*, gdzie elementem podlegającym decyzji jest sposób dostarczania surowców energetycznych. Na potrzeby przypadku przyjęto założenie, że surowce te mogą być dostarczane ze źródeł zewnętrznych (import) lub być produkowane przez RP. Uwzględniając możliwe rozwiązania należy stwierdzić, że istnieją dwa stany równowagi, gdzie surowce pozyskiwane są zarówno w ramach importu jak i w ramach produkcji własnej. Oparcie dostaw jedynie o własną produkcję pozwala na uzyskanie takiej samej wypłaty jak w przypadku dywersyfikacji źródeł dostaw przy jednoczesnej przewadze nad podmiotami zewnętrznymi (w tabeli 4 ten wariant zaznaczono kolorem czerwonym), natomiast rozwiązanie takie obciążone jest zwiększonym ryzykiem. Wzrost poziomu ryzyka wynika z możliwych działań podejmowanych przez pozostałych graczy na rynku w sytuacji odczuwania przez nich zagrożenia utraty (zmniejszenia) przewagi komparatywnej oraz zwiększenia podatności systemu krajowego na turbulenne zmiany w otoczeniu w przypadku ograniczenia dywersyfikacji dostaw i uzależnienia się od jednego źródła surowców energetycznych.

Tabela 4

Tabela wypłat: analiza strategii pozyskiwania surowców energetycznych

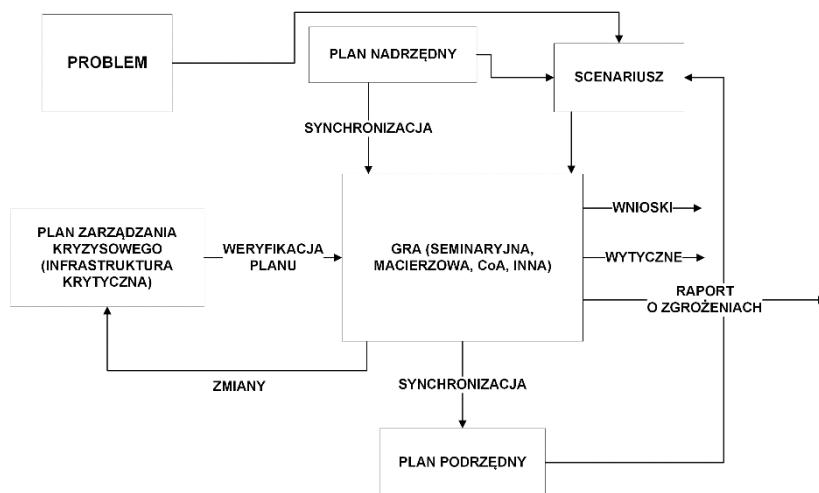
Podmioty zewnętrzne RP	Import (RP)	Produkcja własna (RP)
Import (RP)	-10, +10	-10, -10
Produkcja własna (RP)	+10, +10	+10, -10

W przypadku gdy zarówno środowisko jak również decyzje w nim podejmowane są złożone, zbudowanie odpowiedniego modelu matematycznego może okazać się

utrudnione lub wręcz niemożliwe. Tym samym analiza ilościowa ustępuje miejsca analizie jakościowej. W dalszym ciągu jednak gry decyzyjne będą stanowić źródło danych niezbędnych do podjęcia decyzji. Gry wojenne umożliwiają graczom przede wszystkim podejmowanie ryzykownych decyzji w bezpiecznym środowisku. Umożliwiają poszukiwanie odpowiedzi na pytanie co jeśli?, oraz mogą być narzędziem umożliwiającym zarządzanie ryzykiem, szansami i zagrożeniami które występują lub mogą wystąpić w środowisku [Longley-Brown 2019]. Gracze w ramach gier wojennych pozyskują wiedzę dotyczącą rozważnego problemu a także obserwują zachowania innych graczy, co pozwala uzyskać efekt szkoleniowy [Markley 2015].

4.2. Wykorzystanie gier wojennych w zarządzaniu kryzysowym

Elementem inicjującym przygotowanie i przeprowadzenie gry jest problem określony przez zlecającego. Problem ten może obejmować na przykład zdarzenia dotyczące zakłóceń w funkcjonowaniu infrastruktury krytycznej, jej niszczenia lub odtworzenia [Ustawa o zarządzaniu kryzysowym, 26.04.2007, art. 5b]. W zależności od rodzaju gry analiza problemu może być realizowana poprzez analizę czasową, analizę faz operacji, analizę kluczowych zadań/czynników, analizę przyjętego obszaru działań pod kątem występujących zdarzeń/czynników, analizę sekwencji kluczowych zdarzeń, analizę kierunków działania [Krajacich 2021]. Na rysunku 3 przedstawiono propozycję wykorzystania gry wojennej do weryfikacji planu zarządzania kryzysowego w aspekcie konkretnego problemu badawczego. Zgodnie z przyjętą metodyką środowisko gry powinno zapewnić możliwość zarówno weryfikacji samego planu, jak również jego synchronizacji z planami nadrzędnym i podrzędnym. Niezależnie od weryfikacji planów zarządzania kryzysowego realizacja gry wojennej może również mieć zastosowanie przy opracowywaniu lub weryfikacji siatki bezpieczeństwa obejmującej potencjalne zagrożenia oraz podmioty odpowiedzialne za ich usuwanie a także podmioty współpracujące w tym zakresie [Ustawa o zarządzaniu kryzysowym, 26.04.2007, art. 3 ust 8], a także może stanowić narzędzie do poszukiwania czynników stanowiących potencjalne zagrożenia.



Rys. 3. Wykorzystanie gier wojennych do weryfikacji planów zarządzania kryzysowego w aspekcie infrastruktury krytycznej

Źródło: opracowanie własne.

Aby możliwe było osiągnięcie założonych celów gry, oprócz doboru jej rodzaju, niezbędne jest właściwe przygotowanie scenariusza oraz mechaniki gry, tj. zasad opisujących sposób prowadzenia rozgrywki. Scenariusz musi uwzględniać realność zarówno środowiska, w którym prowadzona jest gra jak również realność działań podejmowanych przez graczy. Na rysunku 3 scenariusz determinowany jest przez trzy zasadnicze elementy: problem oraz plany nadrzędny i podrzędny. Poprawnie zbudowany scenariusz wraz z mechaniką gry oprócz identyfikacji możliwych zdarzeń powinien umożliwiać również określenie wskaźników niezbędnych do uzyskania danych do dalszych analiz. Proces przygotowania scenariusza może obejmować [Schoemaker 1995, Koehler i Harvey 2007, Koniuk 2011]:

- identyfikację interesariuszy oraz ekspertów – np. Zespół Zarządzania Kryzysowego,
- identyfikację trendów – np. z wykorzystaniem analizy PEST,
- identyfikację niepewności (czynników nieznanych),
- opracowanie fabuły,
- opracowanie zdarzeń scenariusza, tj. konkretnych zdarzeń wpisujących się w fabułę scenariusza.

Fabułę scenariusza można opracować wykorzystując macierz scenariuszy. Zawiera ona dwie niepewności na podstawie których budowany jest możliwy rozwój sytuacji. Na rysunku poniżej przedstawiono macierz, w której jako czynniki niepewności wskazano wzrost ekonomiczny oraz poziom pozyskiwania energii. W efekcie otrzymano cztery możliwe scenariusze rozwoju zdarzeń, które mogą mieć wpływ na infrastrukturę krytyczną związaną z pozyskiwaniem energii.

Tabela 5

Macierz scenariuszy z uwzględnieniem niepewności dla zmiennych: wzrost ekonomiczny oraz poziom pozyskiwania energii

	Pozyskiwanie energii na stabilnym poziomie	Ograniczenia w dostępie do zasobów energetycznych (przyczyny technologiczne lub legislacyjne)
Wzrost ekonomiczny. Duże zapotrzebowanie na surowce i energię	Zapewnione dostawy energii przy jednoczesnym wzroście cen	Konieczność zapewnienia dodatkowych źródeł energii (dodatkowi dostawcy, zmiana technologii)
Kryzys ekonomiczny. Zmniejszone zapotrzebowanie na surowce i energię	Konieczność zapewnienia nowych odbiorców lub magazynowania energii	Konieczna interwencja w zakresie utrzymania zdolności do wytwarzania energii

5. PODSUMOWANIE

Celem artykułu było określenie możliwości zastosowania wybranych metod analitycznych na potrzeby analiz ukierunkowanych na zidentyfikowanie strategicznych uwarunkowań funkcjonowania i rozwoju infrastruktury krytycznej. W odpowiedzi na pierwsze pytanie badawcze, wśród metod analizy strategicznej, które mogą zostać zaadaptowane na potrzeby identyfikowania strategicznych uwarunkowań funkcjonowania i rozwoju infrastruktury krytycznej wskazano: metody segmentacji otoczenia (PEST, PMESII, ASCOPE), metody scenariuszowe oraz analizę SWOT, z uwzględnieniem wariantu rozszerzonego SWOT/TOWS. W odpowiedzi na drugie pytanie badawcze o potencjał konektografii do identyfikowania strategicznych uwarunkowań funkcjonowania i rozwoju infrastruktury krytycznej należy stwierdzić, że konektografia pozwala w prosty sposób zmapować kluczowe systemy i wskazać zależności między nimi oraz wspierać tzw. ocenę opartą na konsekwencjach w celu zrozumienia i zarządzania krytycznymi elementami systemów. W odpowiedzi na trzecie pytanie badawcze o możliwości zastosowania gier decyzyjnych (wargaming) do wsparcia analiz uwarunkowań infrastruktury krytycznej i jej bezpieczeństwa stwierdzono, że gry wojenne stwarzają bezpieczne środowisko do wspomaganie procesów podejmowania decyzji. Umożliwiają poszukiwanie odpowiedzi na pytanie co jeśli? Umożliwiają poszukiwanie czynników nieznanych, które mogą mieć istotny wpływ na infrastrukturę krytyczną. Mogą wspomagać procesy zarządzania tą infrastrukturą oraz zarządzania ryzykiem z nią związanym.

LITERATURA

1. AJP-01(E): Allied Joint Doctrine, 2017, NATO Standardization Office.
2. Carter A., Steinbruner J., Zraket, C. (red.), 1987, *Managing Nuclear Operations*, The Brookings Institution, Washington DC.
3. CIMIC Handbook, 2020, Civil-Military Cooperation Centre of Excellence. <https://www.handbook.cimic-coe.org/> (dostęp 23.05.2022).
4. Connectivity Atlas, 2022. <https://atlas.developmentseed.org/all/> (dostęp: 11.06.2022).
5. Gierszewska G., Romanowska M., 1997, *Analiza strategiczna przedsiębiorstwa*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
6. Harvard University, 2022, *Exploring the World of Connectography*. <https://worldmap.maps.arcgis.com/apps/instant/sidebar/index.html?appid=0b8c981f15c0466baa553ba7ac737100> (dostęp: 11.06.2022).
7. Herman, M., Frost, M., Kurz, R., 2009, *Wargaming for Leaders: Strategic Decision Making from the Battlefield to the Boardroom*, McGraw Hill, New York.
8. JP-1: Doctrine for the Armed Forces of the United States, 2013/2017, U.S. Joint Chiefs of Staff.
9. JP-3.0: Joint Operations, 2017, U.S. Joint Chiefs of Staff.
10. JP 5.0: Joint Planning, 2020, U.S. Joint Chiefs of Staff.
11. Khanna P., 2016, *Connectography: Mapping The Future of Global Civilization*, Random House, New York.
12. Koehler D.J., Harvey N., 2007, *Blackwell Handbook of Judgment and Decision-Making*. Wiley-Blackwell, Hoboken.
13. Kononiuk, A., 2011, *Autoreferat rozprawy doktorskiej: Metoda scenariuszowa w antycypowaniu przyszłości na przykładzie Narodowego Programu Foresight „Polska 2020”*, Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
14. Krajacich C., 2021, *COA Analysis & Wargaming*, United States Naval War College, Newport.
15. Longley-Brown G., 2019, *Successful Professional Waragmes: A Practitioner’s Handbook, The History of Wargaming Project*, London.
16. Mokrzycki J., Lis A., 2020, *Kampania NUP 2X35 narzędziem transformacji Sił Zbrojnych RP w organizację wiedzy, Przegląd Sił Zbrojnych*, nr 6, s. 10-15.
17. Mokrzycki J., Reczkowski R., Cieśla S. (red.), 2020, *Analiza środowiska bezpieczeństwa w perspektywie 2035 roku*, Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych, Bydgoszcz.
18. *Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej*, 2013.
19. *Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej – tekst jednolity*, 2020.
20. Markley J., 2015, *Strategic Wargaming Series Handbook*, United States Army War College, Carlisle PA.
21. McHugh F., 1966, *Fundamentals of War Gaming*, Government Printing Office, Washington DC.
22. Perla P., 1990, *The Art of Wargaming: A Guide for Professionals and Hobbyists*, Naval Institute Press, Annapolis MD.
23. Robinson C. P., Woodard J. B., Varnado S. G., 1998, *Critical Infrastructure: Interlinked and Vulnerable*, *Issues in Science and Technology*, vol. 15, no. 1, s. 61-67.

24. Schoemaker P.J.H., 1995, Scenario Planning: A Tool for Strategic Thinking, Sloan Management Review, vol. 36, no. 2, s. 25-40.
25. Strategia Bezpieczeństwa Narodowego Rzeczypospolitej Polskiej, 2020, zatwierdzona w dniu 12 maja 2020 r. przez Prezydenta RP na wniosek Prezesa Rady Ministrów.
26. Strategia Rozwoju Systemu Bezpieczeństwa Narodowego Rzeczypospolitej Polskiej 2022, przyjęta uchwałą Rady Ministrów z dnia 9 kwietnia 2013 r.
27. Szymańska, D., 2022, Wystąpienie podczas seminarium naukowego pt. „Rozwój przestrzenny miast w kontekście przyszłych operacji wojskowych” przeprowadzonego w dniu 2 marca 2022 roku przez Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych oraz Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu w ramach kampanii analiz środowiska bezpieczeństwa pk. „Nowe Urządzenie Polskie – NUP 2X35”.
28. The NATO Alternative Analysis Handbook, 2017.
29. UK MoD, 2017, Wargaming Handbook, Development, Concepts and Doctrine Centre.
30. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 roku o zarządzaniu kryzysowym (t.j. Dz. U. 2022, Nr 261, poz. 583).
31. Wiśniewski M., Ostrowska T., 2016, Wyzwania i dobre praktyki zarządzania bezpieczeństwem infrastruktury krytycznej, Współczesne koncepcje zarządzania publicznego. Wyzwania modernizacyjne sektora publicznego, Fundacja Gospodarki i Administracji Publicznej, Kraków, s. 111-125.
32. Wnorowski M., 2022 w druku, Wargaming: Gry decyzyjne w siłach zbrojnych, Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych, Bydgoszcz.
33. World Cities Report, 2020, The Value of Sustainable Urbanization, United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), Nairobi.

UNDERSTANDING STRATEGIC ANTECEDENTS OF FUNCTIONING AND DEVELOPMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURE: STRATEGIC ANALYSIS, CONNECTOGRAPHY, WARGAMING

Abstract

The aim of the paper is to explore possibilities of employing selected analytical methods for the purposes of analysis aimed at identification of strategic antecedents of functioning and development of critical infrastructure. In order to operationalize the aforementioned aim, the following study questions are analyzed: (1) Which strategic analysis methods may be used for identifying strategic antecedents of functioning and development of critical infrastructure? (2) How can the potential of connectography be employed in this area? (3) What are the possibilities of including wargaming into the toolbox supporting analysis of critical infrastructure antecedents and its security?

Keywords: critical infrastructure, strategic analysis, connectography, wargaming

Tomasz ŁODYGOWSKI*

STRUKTURA DELIKATNA – CZŁOWIEK

Infrastruktura krytyczna ze swej natury służy ludziom. To właśnie człowiekowi do jego harmonijnego rozwoju potrzebne są bezpieczeństwo, zdrowie i edukacja. Tych kilka uwag skupiłem właśnie na sprawach edukacji, którą uważam za podstawę siły i szansy całej społeczności, jak również indywidualnego rozwoju człowieka.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, edukacja

1. WPROWADZENIE

Wywołując temat konferencji „Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej” mieliśmy w zamyśle podsumowanie potrzeb i działań mających na celu zrozumienie mechanizmów i procedur, które w szczególności w sytuacjach nadzwyczajnych pozwolą na w miarę najbezpieczniejsze przetrwanie najważniejszych zasobów państwa czyli jego obywateli.

Jestem pewien, że zaproszeni dostojni wykładowcy, eksperci od lat parający się tematyką bezpieczeństwa zdefiniują i usystematyzują nam pojęcia czym jest infrastruktura krytyczna, której codzienne sprawne działanie, niezauważane przez zwykłych ludzi, gwarantuje im wszystko to co wydaje się oczywiste – dostarczanie energii, czystej wody, sprawne i punktualne działanie transportu i inne. Wiem, że wskazane zostaną szczególne obiekty, których procedury użytkowania i zabezpieczenia przed nieprzewidywanymi sytuacjami wymagają szczególnej troski.

Chciałbym jednak przez chwilę uwagę skierować na jeszcze jeden ważny aspekt, być może niekiedy pozostający tylko w tle dyskusji o wadze infrastruktury krytycznej, mianowicie na sam podmiot troski o bezpieczeństwo, czyli **chronionego człowieka**.

* Politechnika Poznańska

2. POTRZEBY PODMIOTU CHRONIONEGO

Gdyby zadać sobie pytanie: co jest potrzebne człowiekowi, członkowi społeczności do tego by mógł wzrastać, rozwijać się, doświadczać szczęścia i czuć się spełnionym w życiu rodzinnym i społecznym, można by liczyć pewnie na różne mniej lub bardziej szczegółowe odpowiedzi. Sądzę jednak, że tak naprawdę ważne są w pierwszym zgrubnym podejściu tylko trzy najważniejsze elementy. Człowiek powinien być **bezpieczny, zdrowy i edukowany**. Te trzy aspekty życia społecznego powinny determinować aktywność instytucji państwowych w dążeniu do społeczeństwa wielkich możliwości.

Elementami szeroko pojętego bezpieczeństwa, zewnętrznego i wewnętrznego, od ochrony granic, umiejętności reagowania na zdarzenia nieprzewidywalne, poprzez reakcje na zjawiska atmosferyczne, wewnętrzne bezpieczeństwo ekonomiczne społeczeństwa, zabezpieczenia informacyjne oraz ochronę obiektów i procesów kluczowych dla życia społecznego zajmujemy się w ramach dyskusji naszej konferencji. Z pewnością doceniamy wagę tych potrzeb i celowość przeznaczania znacznych zasobów społecznych na cele związane z tak kompleksowo rozumianym bezpieczeństwem państwa – czyli jego obywateli.

Drugim podstawowym elementem jest ochrona zdrowia obywateli. Same statystyki stanu zdrowia naszego społeczeństwa wskazują na to, że jest na tym polu wiele do zrobienia. Mamy świadomość, że w wielu sytuacjach dokonywanie koniecznych zmian związane jest dużymi nakładami finansowymi. Warto sobie jednak udzielić odpowiedzi na pytanie o właściwe i celowe wybranie priorytetów ważnych dla dalszej egzystencji społeczeństwa. Zostawmy problematykę ochrony zdrowia tym, którzy widzą jej problemy z bliska i potrafią zasugerować konieczne zmiany.

Pozostaje trzeci aspekt, który jest mi szczególnie bliski jako wieloletniemu nauczycielowi akademickiemu, mianowicie **edukacja**. Wiem, że w krótkiej wypowiedzi nie sposób sensownie poruszyć nawet małego wybranego aspektu sprawy. W końcu na temat edukacji na wszystkich poziomach napisano setki kilogramów książek, odbyto tysiące konferencji, a system edukacji cały czas wymaga istotnych zmian organizacyjnych, modyfikacji merytorycznych treści programowych i w ogólności docenienia wagi edukacji narodu jako elementu dalekosiężnej strategii.

3. BEZPIECZEŃSTWO EDUKACYJNE PODMIOTU CHRONIONEGO

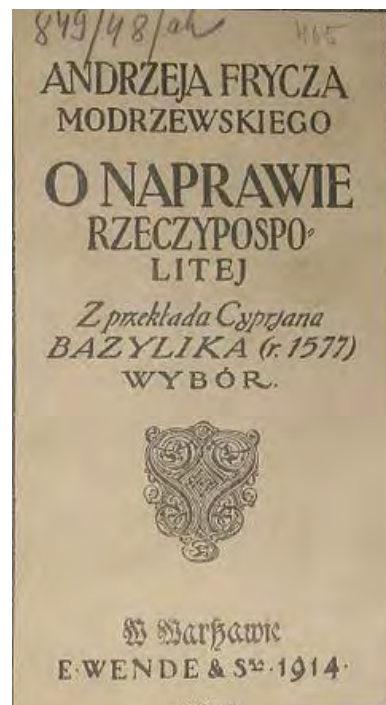
Posługując się pojęciem edukacja mam na myśli nie tylko to co jest istotą przyswajania sobie podstawowych informacji o gromadzonej wiedzy, ale również, a może przede wszystkim wychowanie młodego pokolenia do szanowania osób, umiejętności współpracy z nimi, tolerancji i przyswajanie sobie wielu innych cech powszechnie ukrywających się pod pojęciem dobrego wychowania. Wartość edukacji w rozwoju osobistym człowieka i społeczeństwa jest dziś powszechnie akceptowana. Ale czy na pewno? Czy sposób traktowania całych grup społecznych zaangażowanych w proces edukacyjny nie świadczy o tym, że często deklarowane przez decydentów wartości i zasługi niesione przez edukatorów są tylko werbalne? Niektórzy próbują nawet cytować choćby Jana Zamoyskiego z 1600r., zwykły był mawiać, że „takie będą Rzeczpospolite jakie jej młodzieży chowanie”. Okazuje się, że prawdziwe docenienie wartości edukacji od wieków natrafia u nas na wielkie trudności. Muszę w tym miejscu zacytować wybitnego myśliciela i nauczyciela narodu z XVIw. Andrzeja Frycza-Modrzewskiego, a w szczególności dzieło jego życia „O poprawie Rzeczpospolitej” [1].



Rys. 1. Dzieło z 1551r. ze zbiorów Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz Andrzej Frycz-Modrzewski w wyobrażeniu Jana Matejki.

Dzieło A. Frycza-Modrzewskiego składało się z pięciu ksiąg: *O obyczajach, O prawach, O wojnie oraz O Kościele i O szkole*. Dwie ostatnie pominięto w pierwotnym druku, w wyniku działań cenzury sprawowanej wówczas przez Akademię Krakowską. Całość ukazała się kilka lat później w Szwajcarii. Wydano przekłady na język niemiecki, francuski, a także hiszpański i rosyjski. Dzieło w wersji polskojęzycznej ocenzonej przez tłumaczono w 1577 roku, a pełny tekst polski ukazał się dopiero w 1953 roku.

Już sam fakt, blisko pięciowiekowego specyficznego traktowania tekstu wizjonera, spadkobiercy myśli Arystotelesa, Platona, św. Tomasza z Akwinu czy Erazma z Rotterdamu, dowodzi jak trudno przebić się z argumentami wyprzedzającymi epokę. Jak trudno znaleźć zrozumienie, a tym bardziej zastosować w praktyce konieczne rozwiązania naprawiające system. Dla przykładu zacytuję tu fragmenty książki „O szkole”. Treści były trudne do zaakceptowania w XVIw., wydaje się jednak, że i dzisiaj w jakiejś części pozostają aktualne.



Rys. 2. Strona tytułowa wydania bazylejskiego (1554) oraz przekład Cypriana Bazylika

Tłum. Cypriana Bazylika 1577

„Tak tedy rozumiemy, że szkolny stan jest najcudniejszy i rzeczom ludzkim najpożyteczniejszy, który nam tak wiele mistrzów dobrych nauk spłodził, z którego też tak wiele pożytków wszyscy drudzy stanowie brać zwykli. A to o jego zacności dlatego powiem, abychmy tak rozumieli, że ten stan wszelakim sposobem ma być bronion przeciwko przewrotności sądów i rozpustności ludzi naszego wieku, którzy nic innego tak nie pragnę, oprócz świetności żywota, a mnóstwa bogactw i możliwości: których tylko rzeczy dziś wszędy pilnują, zaś nauki i ten wszystek uczenia się i nauczania warstat ludziom podłym zostawują”.

Poniżej kolejny fragment tym razem we współczesnym tłumaczeniu Erwina Jędrkiewicza.

Księga V „O szkole”, Rozdz. II „O należyte wynagrodzenie Nauczycieli”

„Pomówmy teraz, jakimi wynagrodzeniami i odznaczeniami należy zatrzymywać w szkołach tak nauczycieli, jak i studentów. Ważne to bowiem dla biskupów i rządców spraw ludzkich, aby ochraniać stan nauczycielski wszelkimi sposobami, aby jak to powiadają, chuchać nań i dmuchać. Będzie to nietrudno uczynić, jeśli się oni z troszczą o konieczne środki zarówno na potrzeby uczących się, którzy nie mają z czego pokrywać kosztów studiów, jak i na sprawiedliwe wynagrodzenie nauczycieli.

Widzimy codziennie bardzo wielkie wydatki na rozmaite sprzęty, wspaniałe domy, wyszukane biesiady i inne niekonieczne rzeczy. Czemu nie można znaleźć sposobu na pokrywanie słusznych wydatków, których nie można na nic lepiej obrócić niż na odnowienie i utrzymywanie szkół? Jeśli bowiem idzie o pożytek, nie masz doprawdy większego nad ten, który ma ze szkół religia i państwo. Jeśli zaś idzie o możliwość znalezienia środków na utrzymanie szkół, to największą z pewnością mają ci, którzy obfitują w bogactwa i zasoby kościelne. [...]

Tylko wy, którzy rządzą sprawami ludzkimi, myślcie o tym, by nauka była w poszanowaniu, sprzyjacie ludziom uzdolnionym i pracowitym, bo tyle to znaczy, co sprzyjać chwale religii i pożytkowi Rzeczypospolitej. Waszym właściwym obowiązkiem jest dbać o to, by szkoły tak ustanowiono, tak młodzież wychowano, iżby lepiej i skuteczniej czyniła zadość życzeniom rodziców i przyjaciół oraz oczekiwaniu religii i Rzeczypospolitej. Przed Sędzią Najwyższym musicie zdać rachunek ze spełnienia tego obowiązku i ponieść zasłużoną karę, jeśli go zaniedbacie.

Trzeba się starać o wyznaczenie nauczycielom słusznych wynagrodzeń, aby nie musieli szukać zaspokojenia koniecznych potrzeb życia w innych zajęciach, które by ich odrywały od nauki. [...]

Nigdy bez gniewu nie patrzę na przewrotność tych ludzi, którzy nauczycieli szkolnych mają niemal za nic, choć ich tak samo powinni szanować jak lekarzy, prawników i innych dobrze zasłużonych wobec Rzeczypospolitej. Praca nauczyciela w szkole nie mniejsza niż tamtych, użyteczność zaś równa albo i większa. Bo jeśli społeczność nie może się obejść bez tamtych, to jakże obejdzie się bez tego, kto troszczy się o zachowanie i krzewienie nauki, z której pielęgnowania i dzieł spływają na Rzeczpospolitą i religię tak liczne oraz wielkie korzyści. Aby jacyś nauczyciele nie ubiegali się o stanowiska, którym nie mogą sprostać, byłoby rzeczą wielce korzystną, a nawet konieczną, aby (co jak słyszę, praktykuje się we włoskich akademiach) nie wyznaczano nikomu za jego działalność określonego i stałego wynagrodzenia. Nikt nie powinien otrzymywać wynagrodzenia w stałej wysokości bez względu na to, jak spełnia swoje obowiązki, lecz należy mu wypłacać wynagrodzenie wyższe lub niższe, zależnie od tego, jak się wywiązuje z zadania”.

Jak widać, tak pięć wieków temu tak i dzisiaj, pokonywanie niektórych podstawowych trudności w kwestii docenienia wartości edukacji i roli jaką pełni w społeczeństwie i rozwoju osobistym jednostki nadal czeka na poskromienie. Zostawiam te kwestie tym, którzy mają odpowiedzialność i siły decyzyjne by zadbać o przyszłość naszego narodu.

Dziś powinniśmy się skoncentrować na poważnej i odpowiedzialnej dyskusji w jaki sposób prowadzić wychowanie i nauczanie w dobie niezwykłego przyspieszenia technologicznego [2], wymagającego nieustannych zmian i co ważne uczenia się przez całe życie. Jak wziąć pod uwagę wszelkie uwarunkowania przyszłego rynku pracy, wielostronnego rozwinięcia zainteresowań, nadążania za rozwojem technologii, potrzebnej zmiany kompetencji. Jak zadbać o tę część społeczności, której w najbliższym czasie grozi marginalizacja ze względu na niezdażanie za lawinowo rozwijającą się technologią a co za tym idzie usługami. Te tematy powinny głównie zaprzętać uwagę edukatorów i naukowców po rozwiązaniu podstawowych problemów egzystencjalnych zgodnych z obserwacjami A. Frycza-Modrzewskiego.

4. PODSUMOWANIE

Tematem konferencji jest „Bezpieczeństwo Infrastruktury Krytycznej”, która przecież służy przede wszystkim jakości życia obywateli. Omawiając różne aspekty bezpieczeństwa niekiedy mało zwraca się uwagę na fakt czemu wszystkie te zabiegi służą. Pandemia COVID-19 wykazała jasno, że najważniejszym a jednocześnie najbardziej kruchym elementem tej struktury jest człowiek. Doświadczaliśmy tego, że nieobecność w pracy tysięcy pracowników i wszelkie konieczne obostrzenia pandemiczne wywołały znaczne perturbacje w gospodarce kraju. Z tego powodu, niejako traktując człowieka jako ogniwo tej struktury, pozwoliłem sobie na uwagi związane

przede wszystkim bezpośrednio z obywatelami ich potrzebami duchowymi wychodzącymi poza aspekty zapewniające mu fizyczne bezpieczeństwo. Zawarte treści nie rozwiązują dotykanych problemów, ale są kolejnym głosem zwracającym uwagę na konieczność podjęcia tematów związanych z edukacją i nauką, gdyż z pewnością taka będzie nasza Ojczyzna jak będziemy kształtować przyszłość młodzieży. Koszty poniesione na ten cel zwrócą się wielokrotnie, zaś zaniedbania będą spychać nasz Naród na pozycje, do których z pewnością nie aspirujemy.

LITERATURA

1. Andrzej Frycz-Modrzewski, O naprawie Rzeczpospolitej, Kraków, Drukarnia Łazarzowa, 1551
2. Joseph E. Aoun, Higher education in the age of artificial intelligence, The MIT Press 2017

DELICATE STRUCTURE – HUMAN

Abstract

Critical infrastructure by its nature serves people. It is people who need safety, health and education for their harmonious development. I focused these few remarks on the issues of education, which I consider to be the basis of strength and opportunity for the entire community, as well as individual human development.

Keywords: safety, education

Jędrzej ŁUKASIEWICZ*
Anna KOBASZYŃSKA-TWARDOWSKA**

ANALIZA SEKWENCJI ZDARZEŃ W CZASIE ATAKU NA OBIEKT INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ PROWADZONEGO ZA POMOCĄ BEZZAŁOGOWEGO STATKU POWIETRZNEGO

Bezzałogowe statki powietrzne zysane potocznie dronami są źródłem zagrożeń dla obiektów ważnych dla bezpieczeństwa państwa w tym dla obiektów infrastruktury krytycznej. Codzienne doniesienia medialne wskazują, że statki te, ze względu na swoje cechy użytkowe, są coraz częściej stosowane w atakach zarówno na ludzi, w tym na polityków jak i na obiekty przemysłowe. Analiza sekwencji zdarzeń występujących od rozpoczęcia startu przez drona do zakończenia przeprowadzanego ataku, jak również poznanie metod detekcji, neutralizacji oraz metod prewencji może być podstawą wypracowania procedur bezpieczeństwa dla operatorów infrastruktury krytycznej, a tym samym przyczynić się do rozwinięcia sposobów ograniczenia ryzyka w tych obszarach.

Słowa kluczowe: infrastruktura krytyczna, bezzałogowe statki powietrzne, sekwencja ataku.

1. WPROWADZENIE

Bezzałogowe statki powietrzne (BSP) są platformami, które ze względu na cechy użytkowe oraz stosunkowo niewielki koszt budowy i eksploatacji znalazły zastosowanie w wielu obszarach działalności ludzkiej. Powszechny dostęp do masowo produkowanych i sprzedawanych bezzałogowych statków powietrznych, różnorodność konstrukcji, niska cena, a także brak prawnego przymusu rejestracji statku po zakupie czyni je także narzędziem, które może być wykorzystane, w sposób anonimowy, do celów nie zawsze zgodnych z prawem. Do bezzałogowych statków powietrznych zalicza się statki typu: multirotor, samolot i śmigłowiec (Wyszywacz, 2020). Coraz

* Politechnika Poznańska Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu.

** Politechnika Poznańska Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu.

powszechniejsze są również hybrydy tych konstrukcji, np. samoloty posiadające zdolność pionowego startu, tzw. VTOLe. Cechy konstrukcyjne każdego typu statku powietrznego pozwalają na optymalny dobór statku do konkretnej misji. Bezzałogowe statki powietrzne mogą odbyć lot po zaprogramowaniu trasy przed startem oraz pod kontrolą pilota. Programowanie misji przed startem możliwe jest za pomocą aplikacji, w której podaje się punkty (waypoints) do których ma dolecieć statek powietrzny oraz parametry lotu w tym wysokość oraz prędkość. Lot pod kontrolą pilota odbywa się za pomocą aparatury sterującej, wyposażonej najczęściej w ekran, na którym pilot może odczytać parametry lotu. Ekran pozwala też na skorzystanie z kamery pokładowej. Bezzałogowy statek powietrzny, bez względu na typ, to platforma, która może podnieść ładunek użytkowy. Jedynym ograniczeniem jest masa tego ładunku. Ładunkiem użytkowym może być między innymi przesyłka, ładunek wybuchowy, kamera, skaner, różnego rodzaju czujniki, itd.

Bezzałogowe statki powietrzne są, wraz z załogowymi statkami powietrznymi, równorzędnymi użytkownikami przestrzeni powietrznej. Misje bezzałogowe regulowane są przepisami prawa zarówno na poziomie europejskim (Commission Implementing Regulation, 2019) jak i polskim (Ustawa Prawo Lotnicze, 2002), (Urząd Lotnictwa Cywilnego, 2021). Zgodnie z przepisami europejskimi loty bezzałogowych statków powietrznych podzielone są na kategorie związane z poziomem ryzyka na loty w kategorii OPEN (otwartej), SPECIFIC (szczegółnej) i CERTIFIED (certyfikowanej). Loty w kategorii OPEN obciążone są najniższym poziomem ryzyka. Loty w kategorii SPECIFIC obciążone są średnim poziomem ryzyka. Najwyższym poziomem ryzyka obciążone są loty w kategorii CERTIFIED, ale kategoria ta jest przeznaczona do wykonywania przewozu osób oraz materiałów niebezpiecznych. Przepisy prawa precyzyjnie opisują zasady wykonywania lotów we wszystkich trzech kategoriach. Loty w kategorii OPEN są lotami, które można wykonywać za pomocą statków o maksymalnej masie startowej do 25 kg, ale odległość pozioma takiego statku w czasie lotu od osób powinna być nie mniejsza niż 150 metrów oraz do wysokości 120 metrów do najbliższego punktu terenu, nad którym wykonywany jest lot. W przypadku kategorii SPECIFIC możliwe są loty statkami powietrznymi o masie do 25 kg, ale odległość od osób nie została w przepisach sprecyzowana zatem możliwe są loty w pobliżu ludzi. Przyjęta wysokość, do której można wykonać lot to 120 metrów od najbliższego punktu terenu, nad którym wykonywany jest lot. W kategorii SPECIFIC możliwe jest uzyskanie zgody Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego na wykonanie lotu na niestandardowych zasadach, w tym możliwe jest uzyskanie zgody na lot na pułapie powyżej 120 metrów nad poziomem terenu.

Przepisy prawa pozwalają na ustanowienie tzw. dronowych stref geograficznych (tzw. Drone Areas) na potrzeby uporządkowania ruchu bezzałogowego w przestrzeni powietrznej (Urząd Lotnictwa Cywilnego, 2020). Strefy te nie są tożsame ze

stałymi i elastycznymi elementami przestrzeni dla lotnictwa załogowego i charakteryzują się różnymi zasadami wykonywania lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi. Do dronowych stref geograficznych zaliczamy:

1) DRA-P – strefę zakazaną, w której operacje przy użyciu systemów bezzałogowych statków powietrznych nie mogą być wykonywane,

2) DRA-R – strefę ograniczoną dla systemów bezzałogowych statków powietrznych, w której operacje przy użyciu systemów bezzałogowych statków powietrznych mogą być wykonywane za zgodą i na warunkach określonych przez Polską Agencję Żeglugi Powietrznej lub podmiot uprawniony, na wniosek którego strefa geograficzna została wyznaczona, w tym:

a) DRA-RH – strefę ograniczoną dla systemów bezzałogowych statków powietrznych o wysokim prawdopodobieństwie uzyskania zgody na operacje, o których mowa powyżej,

b) DRA-RM – strefę ograniczoną dla systemów bezzałogowych statków powietrznych, o średnim prawdopodobieństwie uzyskania zgody na operacje, o których mowa powyżej,

c) DRA-RL – strefę ograniczoną dla systemów bezzałogowych statków powietrznych, o niskim prawdopodobieństwie uzyskania zgody na operacje, o których mowa w powyżej,

3) DRA-T – strefę ograniczoną dla systemów bezzałogowych statków powietrznych, w której Agencja wskazuje wymogi techniczne, które obowiązany jest spełniać system bezzałogowego statku powietrznego, przy pomocy którego realizowana ma być operacja; dla strefy DRA-T dopuszcza się wprowadzenie dodatkowych warunków wykonywania operacji, w tym obowiązku uzyskania zgody na operacje,

4) DRA-U – strefę geograficzną dla systemów bezzałogowych statków powietrznych, w której operacje systemów bezzałogowych statków powietrznych mogą odbywać się wyłącznie przy wsparciu określonych, zweryfikowanych usług zapewnianych w tej strefie i na warunkach wskazanych przez Polską Agencję Żeglugi Powietrznej,

5) DRA-I – strefę informacyjną dla systemów bezzałogowych statków powietrznych, zawierającą informacje konieczne dla zapewnienia bezpieczeństwa wykonywania operacji przy użyciu systemów bezzałogowych statków powietrznych, w tym ostrzeżenia nawigacyjne.

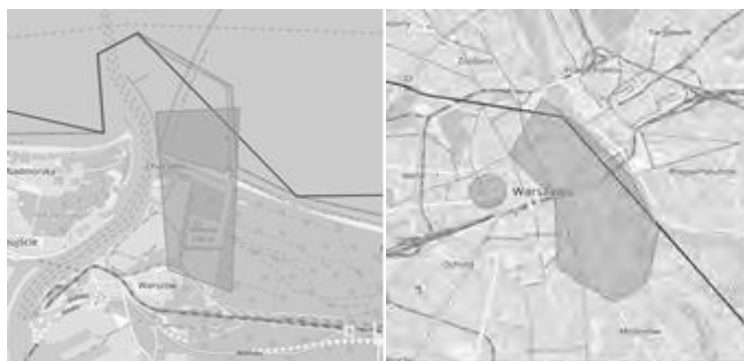
Przestrzeń powietrzna do wysokości ok. 2850 – 2950 (w zależności od wielkości ciśnienia atmosferycznego) metrów nad średnim poziomem morza nie ograniczona dronowymi strefami geograficznymi lub strefami dla lotnictwa załogowego jest przestrzenią niekontrolowaną, w której loty bezzałogowych statków powietrznych odbywają się na ogólnych zasadach zapisanych w przepisach prawa (Commission Implementing Regulation, 2019), (Urząd Lotnictwa Cywilnego, 2021). Loty w każdej w wyżej wymienionych kategorii muszą się odbywać na zasadach przypisanych do danego elementu struktury przestrzeni powietrznej.

Bezzałogowe statki powietrzne mogą stanowić zagrożenie dla obiektów ważnych dla bezpieczeństwa państwa, w tym dla obiektów infrastruktury krytycznej. O wykorzystaniu bezzałogowców do celów niezgodnych z przepisami prawa informują media praktycznie codziennie. Do najgłośniejszych przypadków ataków bezzałogowych platform na obiekty można zaliczyć: atak na instalacje Saudi Aramco (Safi, 2019) atak na sieci elektroenergetyczne w USA oraz atak na osłonę reaktora w Bugey we Francji. Atak na instalacje Saudi Aramco miał miejsce w dniu 14 września 2019 r. i był przeprowadzony przez islamistów z Jemeńskiego ruchu Houthi. W ataku brało udział 25 bezzałogowych statków powietrznych, a w jego wyniku instalacje zostały spalone. Konsekwencją ataku było zawahanie się cen ropy na rynkach światowych, wskutek czego ceny ropy urosły o 20% oraz straty finansowe firmy Saudi Aramco (The Wall Street Journal, 2019). Kolejnym przykładem ataku z użyciem bezzałogowego startku powietrznego jest atak na francuskie instalacje elektrowni jądrowej w Bugey który miał miejsce w dniu 3 lipca 2018. Ataku dokonał Greenpeace. W wyniku ataku uderzono w betonową osłonę reaktora za pomocą BSP w kształcie Supermana (Reuters, 2018). Sam atak nie wyrządził szkód materialnych, ale przyczynił się do rozpoczęcia dyskusji na temat bezpieczeństwa fizycznego elektrowni jądrowych we Francji. Grupy radykałów postulowały zamknięcie elektrowni będących głównym źródłem energii elektrycznej we Francji. Francja wytwarza w elektrowniach jądrowych ok. 70% swojej energii elektrycznej osiągając w 2020 roku 353833GWh (IEA, 2022). Domniemany atak za pomocą bezzałogowego statku powietrznego z podwieszonym przewodem elektrycznym został wykryty w USA (Barret, 2021). Jakkolwiek sam atak nastąpił najprawdopodobniej w lipcu 2020 to informacje na jego temat zostały opublikowane dopiero w listopadzie 2021 (Jones, 2021). Ze względu na rozległość obszarową sieci elektroenergetycznej zapobieganie atakom na elementy tej sieci jest trudne (Łukasiewicz, 2022). Obiekty infrastruktury krytycznej, budowane w okresie, w którym bezzałogowe statki nie były popularne ani łatwo dostępne są z pewnością stosunkowo łatwym celem ataku.

2. METODY PREWENCYJNE

Obecnie stosowane systemy złożone z urządzeń detekcyjnych i neutralizujących BSP są systemami dalece nieskutecznymi. Prowadzenie badań naukowych jak i budowa komercyjnych systemów pozwala na detekcję i neutralizację statków tylko w określonych sytuacjach, często systemy te są budowane przeciw komercyjnym, dostępnym w sprzedaży dronom. Stosowanie bezzałogowych statków powietrznych samodzielnie budowanych oraz wykonywanie lotów przez pilota świadomego zasad działania systemów antydronowych zmniejsza prawdopodobieństwo detekcji i neutralizacji. Znacząca część obiektów nie jest wyposażona w jakiegokolwiek antydronowe systemy. W takiej sytuacji można stosować metody prewencyjne mające na celu zapobieganie atakowi. Do metod prewencji można zaliczyć:

1. Wyznaczanie nad obiektami ważnymi dla bezpieczeństwa państwa geograficznych stref dronowych (Urząd Lotnictwa Cywilnego, 2020). Strefy dronowe wyznacza Polska Agencja Żeglugi Powietrznej, a o ich wyznaczenie może wnioskować ze względu na potrzeby działań lub czynności o szczególnym znaczeniu operacyjnym lub rozpoznawczym, zapewnienie bezpieczeństwa państwa lub porządku publicznego, prowadzonych w celu realizacji ustawowych zadań przez Siły Zbrojne Rzeczypospolitej Polskiej, Agencję Bezpieczeństwa Wewnętrznego, Agencję Wywiadu, Policję, Straż Graniczną, Krajową Administrację Skarbową lub Służbę Ochrony Państwa, Dowódca Operacyjny Rodzajów Sił Zbrojnych, Komendant Główny Żandarmerii Wojskowej, Szef Szefostwa Służb Ruchu Lotniczego Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej, Szef Agencji Bezpieczeństwa Wewnętrznego, Szef Agencji Wywiadu, Komendant Główny Policji, Komendant Główny Straży Granicznej, Szef Krajowej Administracji Skarbowej lub Komendant Służby Ochrony Państwa. Ze względu na potrzeby ochrony infrastruktury krytycznej, zapobieganie skutkom klęsk żywiołowych lub ich usuwanie, ratowanie życia lub zdrowia ludzkiego Komendant Główny Policji, Komendant Główny Państwowej Straży Pożarnej lub Dyrektor Rządowego Centrum Bezpieczeństwa. Ze względu na realizację zadań ustawowych Prezes Urzędu Lotnictwa Cywilnego lub na wniosek Państwowej Komisji Badania Wypadków Lotniczych. Na rysunku 1 przedstawiono przykłady geograficznych stref dronowych DRA-P wyznaczonych nad Gazoportem w Świnoujściu oraz nad centrum Warszawy.



Rys. 1. Strefa DRA-P wyznaczona nad Gazoportem w Świnoujściu, oraz strefy DRA-P wyznaczone nad śródmieściem Warszawy. Źródło: AUP Polska na dzień 2022-05-26

W strefach DRA-P loty są co do zasady niedozwolone, ale możliwe jest uzyskanie zgody od zarządzającego strefą na wykonanie lotu. Zarządzający strefą określa warunki na jakich lot może się odbyć.

2. Zaostrzenie kar za wykonywanie lotów niezgodnie z warunkami. Zgodnie z przepisami pilot bezzałogowego statku powietrznego odpowiada za decyzję o starcie, wykonaniu misji i lądowaniu. Zgodnie z Ustawą Prawo lotnicze, Art.212 (Ustawa Prawo Lotnicze, 2002) Kto wykonując lot przy użyciu statku powietrznego

narusza przepisy dotyczące ruchu lotniczego obowiązujące w obszarze, w którym lot się odbywa lub narusza, wydane na podstawie art. 119 ust. 2 ustawy, zakazy lub ograniczenia lotów w polskiej przestrzeni powietrznej wprowadzone ze względu na konieczność wojskową lub bezpieczeństwo publiczne, podlega karze pozbawienia wolności do lat 5. Ze względu na postęp technologiczny w konstrukcjach statków powietrznych i pojawienie się nowych bezzałogowych platform, ustawa ta będzie nowelizowana (Rządowe Centrum Legislacji). Na mocy znowelizowanej ustawy pilot bezzałogowego statku powietrznego, który naruszy przepisy lotów w strefie, czego konsekwencją będzie zestrzelenie platformy, która spadając spowoduje szkody, będzie odpowiadał finansowo za te straty.

3. Szkolenia z przepisów prawa funkcjonariuszy Policji. Funkcjonariusze Policji patrolujący rejon chronionego obiektu powinni znać prawo lotnicze dotyczące bezzałogowych platform, mieć świadomość struktury oraz zasad wykonywania lotu w przestrzeni wyznaczonej nad chronionym obiektem. Znajomość struktury oznacza, że funkcjonariusz zna między innymi lokalizację poziomych granic strefy. Znajomość ta może pozwolić na dokonanie oceny czy bezzałogowy statek powietrzny leci w wyznaczonej strefie czy poza nią i ewentualnie ocenić czy lot odbywa się za zgodą i na warunkach określonych przez zarządzającego strefą. Elementem szkolenia powinna być także nauka obsługi aplikacji wspomagających zarządzanie przestrzenią powietrzną, takich jak DroneRadar.

4. Szkolenie z przepisów prawa oraz z pilotażu personelu ochrony fizycznej chronionego obiektu. Personel ochrony fizycznej obiektu powinien znać nie tylko prawo lotnicze i zasady wykonywania lotów w rejonie chronionego obiektu, ale także posiadać umiejętność pilotażu bezzałogowych statków powietrznych dla celów patrolowych. Lot bezzałogowego statku, pilotowanego przez członka personelu, na perymetr obiektu może przyczynić się do wcześniejszego wykrycia wrogich działań oraz przyczynić się do rezygnacji z ataku na obiekt.

5. Wyznaczanie tzw. „No Fly Zone” (NFZ) (DJI, 2022). Niektórzy producenci platform bezzałogowych oferują możliwość wgrania w oprogramowanie statku powietrznego danych ograniczających możliwość wykonania lotu w zdefiniowanej przestrzeni. Do takich producentów należy firma Shenzhen DJI Sciences and Technologies Ltd., produkujący i sprzedający na światowych rynkach rekordową liczbę platform. Ograniczenia te stosować należy jednak z dużą ostrożnością, ponieważ wskazanie miejsca, w którym ma powstać NFZ jest *de facto* wskazaniem miejsca, w którym znajduje się obiekt ważny dla bezpieczeństwa państwa. Jest to zatem dostarczenie informacji wywiadowczych chińskiemu producentowi.

3. WYBRANE METODY ATAKU OBIEKTU INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ

Ze względu na różnorodną konstrukcję bezzałogowe statki mogą być wykorzystane do atakowania obiektów i ludzi. Sposobów atakowania jest bardzo wiele do najczęściej wymienianych sposobów należą (Łukasiewicz, et al. 2021):

1. kinetyczne zderzenie statku powietrznego z obiektem mające na celu uszkodzenie instalacji obiektu,
2. przeniesienie przez statek powietrzny ładunku wybuchowego i detonacja tego ładunku, mające na celu uszkodzenie instalacji obiektu,
3. przeniesienie przez statek powietrzny środków chemicznych i ich zrzut, mający na celu kontaminację terenu obiektu lub większego obszaru, na którym obiekt jest zlokalizowany,
4. wykorzystanie kamer działających w paśmie podczerwieni i widzialnym promieniowania elektromagnetycznego do obserwacji obiektu, w tym do zbierania danych na temat technologii przemysłowych wykorzystywanych w obiekcie i codziennej aktywności pracowników obiektu,
5. wykorzystanie skanerów komunikacji do podsłuchiwania lub zakłócania komunikacji personelu obiektu.

4. SPOSOBY NEUTRALIZACJI DRONÓW ORAZ SPOSOBY ZAPOBIEGANIA POWSTANIU STRAT W PRZYPADKU ROZPOCZĘTEGO ATAKU

Neutralizację bezzałogowego statku powietrznego można podzielić na dwa etapy: etap detekcji oraz etap przerwania misji. Detekcję bezzałogowych statków powietrznych prowadzi się wykorzystując różne metody. Zaliczamy do nich detekcję radarową, detekcję poprzez rozpoznanie statku za pomocą kamer rejestrujących obraz w paśmie widzialnym i podczerwonym promieniowania elektromagnetycznego i analizujących zarejestrowany obraz, detekcję za pomocą mikrofonów wykrywających hałas emitowany przez rotujące elementy statku takie jak silniki i śmigła, detekcję komunikacji pomiędzy lecącym statkiem powietrznym a stacją naziemną. Żadna ze wskazanych metod detekcji nie zapewnia zadowalającej skuteczności.

Metoda radarowa jest skuteczna w przypadku detekcji platformy lecącej na dużej wysokości (Maestre, et al. 2019). Metoda ta pozwala też na detekcję z dużej odległości. Detekcja radarowa zawodzi w przypadku prób detekcji statku lecącego na niskim pułapie lub w przypadku gdy chroniony obiekt znajduje się na terenie otoczonym zabudowaniami lub zaroślami lub w przypadku lotu na niewielkich wysokościach rzędu kilkudziesięciu centymetrów nad ziemią.

Detekcja za pomocą kamer pracujących w paśmie widzialnym lub podczerwonym jest kolejną metodą detekcji (Wu, et al. 2017). Kamery rejestrują obraz lecącego obiektu, a specjalistyczne oprogramowanie ocenia czy wykryty obiekt jest platformą bezzałogową. W przypadku kamer działających w obszarze widzialnym do detekcji wymagane są odpowiednie warunki świetlne. Detekcję taką można łatwo oszukać konstruując drony o nietypowych kształtach. Obecnie dostępne są w handlu statki w kształcie ptaków, statków, których kształt inspirowany jest trylogią filmową „Gwiezdne wojny”, a nawet postacią Supermana (Reuters, 2018). Ponieważ detekcja za pomocą rozpoznania obrazu odbywa się poprzez stosowanie algorytmów AI, które muszą zostać nauczone rozpoznawania właściwych kształtów i kolorów, zbudowanie statku powietrznego o nietypowym kształcie jest przyczyną oszukania urządzenia detekcyjnego. W słabych warunkach oświetleniowych można do detekcji użyć kamer pracujących w paśmie podczerwonym promieniowania elektromagnetycznego. Ciepło rejestrowane przez kamery pochodzi od elementów, które w czasie pracy się nagrzewają. Do takich elementów należy pakiet lipowo-polimerowy lub silniki. Ciepło może być też emitowane przez radiatory układów elektronicznych. Rozpoznanie statku za pomocą kamer działających w podczerwieni można jednak utrudnić, a techniki rozpraszania ciepła, tak by było ono niewykrywalne znane są z wojskowego lotnictwa załogowego.

Detekcja za pomocą mikrofonów ma na celu wykrycie hałasu emitowanego przez lecący statek powietrzny (Schäffer, 2021). Źródłem hałasu są wszelkie elementy, które poruszają się względem powietrza. Do najgłośniejszych elementów lecącego statku należą silniki i śmigła. Detekcja hałasu jest utrudniona w przypadku użycia mikrofonów w miejscach, w których hałas jest emitowany z wielu źródeł. Do takich miejsc należą centra miast, miejsca w których odbywa się ruch środków transportu publicznego, duże natężenie ruchu samochodowego, poblizko lotnisk, poblizko zakładów produkcyjnych. Dodatkowo mikrofon może nie wykryć statku powietrznego typu samolot lecącego lotem ślizgowym bez użycia silnika. Do detekcji komunikacji pomiędzy statkiem powietrznym a stacją naziemną używa się skanerów częstotliwości (Solidakis, 2017). Skanery takie skanują widmo promieniowania elektromagnetycznego dla częstotliwości na których odbywa się komunikacja statku ze stacją naziemną. Najczęściej komunikacja ta odbywa się na częstotliwościach 2.4GHz, 5.6GHz, 868MHz, 344MHz oraz częstotliwości odpowiadające łączności GSM. Najbardziej głośnym skanerem wykrywającym komunikację jest produkt Aeroscope firmy DJI (DJI, 2022). Produkt ten umożliwia wskazanie położenia statku powietrznego produkowanego przez DJI na podstawie odczytu położenia z umieszczonego na pokładzie odbiornika satelitarne, może wskazać parametry lotu statku powietrznego na podstawie odczytów z akcelerometrów, żyroskopów oraz barometru umieszczonych na statku. Może również wskazać lokalizację stacji naziemnej, za pomocą której pilot steruje statkiem powietrznym. Aeroskop nie współpracuje ze statkami produkowanymi przez innych producentów.

Wykrycie statku powietrznego jest trudne i wymaga zastosowania w jednym systemie detekcyjnym urządzeń działających na różnych zasadach. Wykrycie statku powietrznego jest warunkiem reagowania na jego lot. Do neutralizacji statku powietrznego stosuje się różne technologie. Te najbardziej popularne to emisja impulsu elektromagnetycznego o dużej energii, niszczącej układy elektroniczne statku (The National Interest, 2021). Typowe, produkowane komercyjnie, do zastosowań cywilnych, statki powietrzne nie są odporne na impuls elektromagnetyczny, zatem można je uszkodzić. W przypadku konstrukcji bardziej zaawansowanych układy elektroniczne ukrywa się w osłonach, tzw. klatkach Faradaya, a na przewody zakłada się filtry obcinające wartość generowanego prądu. Statki takie są zatem bardziej odporne na impuls. Inną metodą neutralizacji jest zakłócenie sygnału systemu pozycjonowania prowadzące do pogubienia się statku w przestrzeni lub zafałszowanie sygnału systemu pozycjonowania prowadzące do skierowania statku powietrznego w kierunku błędnej lokalizacji (Sahmoudi, et al. 2009). Obecnie niemal każda, dostępna komercyjnie, konstrukcja wyposażona jest w odbiornik sygnału satelitarnego zatem metoda ta jest dość skuteczna. Konstrukcje bardziej zaawansowane wyposażone są w systemy nawigacji inercyjnej, która zapobiega pogubieniu się statku w przypadku zakłócenia sygnału satelitarnego. Inną metodą neutralizacji lecącego bezzałogowca jest wykorzystanie systemów miotających siatkę, która wplątuje się w części ruchome statku powodując jego upadek (Wyant, 2016). Wadą systemu jest przymus oddania strzału siatki z niewielkiej odległości. Do najnowszych metod neutralizacji statku w powietrzu jest zastosowanie urządzeń laserowych (The Defence Post, 2022). Urządzenie takie emituje promieniowanie laserowe o dużej energii powodując zapalenie się lecącego statku. Laser musi być zasilany ze źródła o dużej mocy, czas naświetlania statku wynosi kilka sekund a jego skuteczność zależy od warunków pogodowych. Opady deszczu, śniegu, mgła lub inne czynniki pogodowe mogą obniżyć skuteczność urządzeń laserowych. Systemy detekcji i neutralizacji dronów są systemami, które nie gwarantują zadowalającej skuteczności. Stosuje się zatem inne metody ograniczające straty wynikłe z ataku za pomocą platformy bezzałogowej. Do takich metod można zaliczyć maskowanie elementów infrastruktury istotnych dla ciągłości działania obiektu. Maskowanie powoduje, że kamera zamontowana na statku powietrznym nie będzie mogła zarejestrować obrazu, a tym samym nie będzie możliwe pozyskanie informacji o obiekcie. Drugą metodą, która może zabezpieczyć chroniony obiekt przed atakiem z użyciem bezzałogowca jest stosowanie osłon wykonanych z materiałów odpornych na działanie ciśnienia wywołanego eksplozją materiałów wybuchowych przenoszonych na bezzałogowej platformie (Studzinski, 2021). Znacząca większość obiektów została zbudowana w czasie gdy technologia bezzałogowa nie była jeszcze popularna. Obiekty te nie są zatem zaprojektowane w sposób, który umożliwiłby obronę przed atakiem bezzałogowca. W przypadku nowobudowanych obiektów (Forsal, 2021), które potencjalnie mogą się stać infrastrukturą krytyczną zagrożenie w postaci atakującego bezzałogowego statku powietrznego powinno być brane pod uwagę.

5. REAGOWANIE NA RYZYKO ZAGROŻEŃ

5.1. Sposoby reagowania na ryzyko zagrożeń

W każdym obszarze związanym z działalnością transportową także dla ruchu bezzałogowych statków powietrznych powinna być przeprowadzona ocena ryzyka zgodnie z obowiązującymi przepisami. Wynika to z faktu, że są to miejsca w których generowane są zagrożenia start dla ludzi, środowiska i obiektów technicznych. Po określeniu poziomu ryzyka zgodnie z przyjętymi zasadami dla danej gałęzi transportu (tab.1) należy zająć aktywną postawę wobec zidentyfikowanych zagrożeń.

Tabela 1

Dopuszczalność ryzyka w transporcie

Działania wynikające z poziomu ryzyka	Klasyfikacje ryzyka w różnych gałęziach transportu			
	Drogowy	Kolejowy	Powietrzny	Wodny
ryzyko dopuszczalne – brak działań redukujących ryzyko, kontrola obszaru	A – bardzo małe	1	A - Akceptowane	Akceptowane
ryzyko tolerowane – działania zmierzające do redukcji ryzyka	B – małe	2	R – niepożądane	Obszar redukcji ALARP
	C – średnie			
	D – duże			
ryzyko niedopuszczalne – nie powinno się dopuścić do funkcjonowania obszaru analiz	E – bardzo duże	3	U – nieakceptowane	Nieakceptowane

Źródło opracowanie własne na podstawie (Kadziński i Gill 2009)

Reagowanie na ryzyko może polegać na (Kadziński i Gill 2009) :

- postępowaniu wobec ryzyka – unikaniu, redukowaniu (kontrolowaniu), przeniesieniu (transferze) lub zatrzymaniu (retencji) ryzyka na określonym poziomie,
- monitorowaniu ryzyka – działania służące bieżącej kontroli wskazanego obszaru
- komunikowaniu o ryzyku – przekazywanie i wymiana informacji związanej z ryzykiem.

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości postępowania wobec ryzyka dla zdarzenia inicjującego jakim jest nieautoryzowany wlot BSP nad obiekt w nieznanym celu. Założono, że celem może przeprowadzenie ataku lub inne działania niezgodne z przepisami a mogące powodować negatywne konsekwencje.

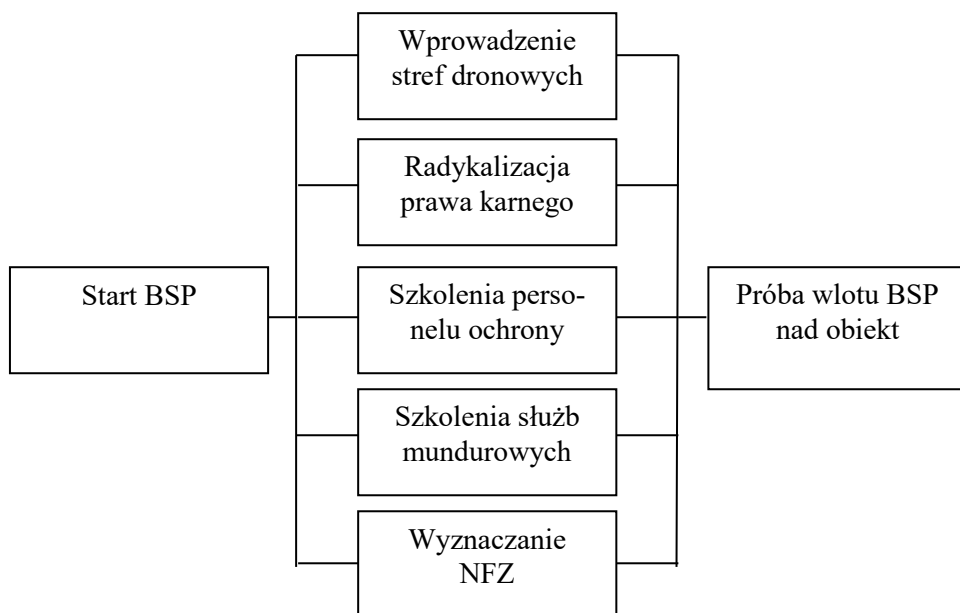
5.2. Postępowanie wobec ryzyka zagrożeń

Jednym ze sposobów postępowania wobec ryzyka zagrożeń jest stosowanie środków redukcji ryzyka, których zadaniem jest zmniejszenie prawdopodobieństwa aktywizacji zagrożenia. Środkami redukcji ryzyka mogą być zarówno urządzenia techniczne, elementy środowiska jak również przepisy, procedury czy zachowania ludzkie. Po identyfikacji źródeł zagrożeń dowolną metodą (FTA, ETA, Bow-Tie, Check Listy i inne) należy dobrać środek redukcji ryzyka, określić jego stopień skuteczności i wskazać osoby odpowiedzialne za działanie tego środka (Gill, Kobaszyńska 2013).

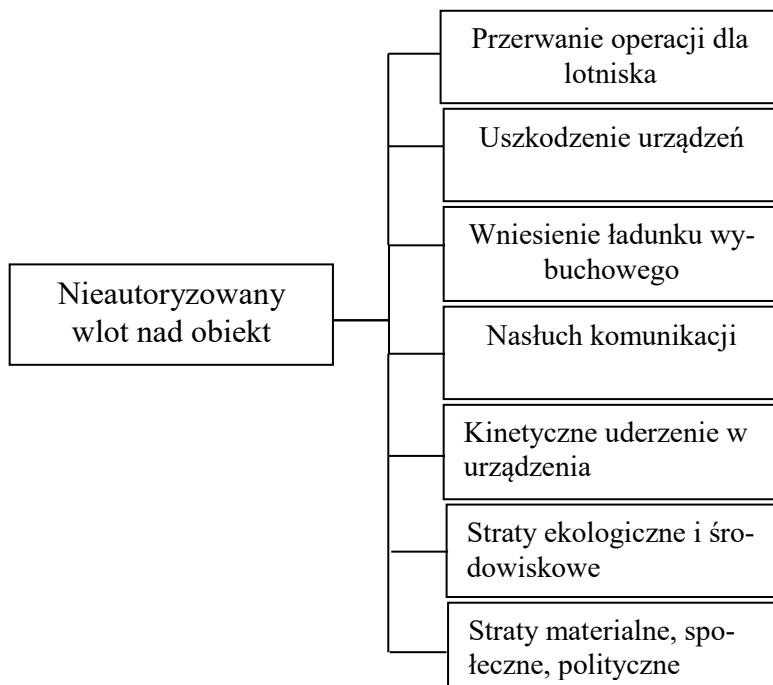
Najczęściej stosowaną klasyfikacją środków redukcji ryzyka jest dwustopniowa klasyfikacji na środki: materialne i niematerialne. Materialne środki redukcji to te o charakterze technicznym, nazywane także – technicznymi środkami ochronnymi. Są to osłony (fizyczne bariery zaprojektowane jako część maszyny, której funkcją jest zapewnienie ochrony) lub inne urządzenia ochronne: urządzenia alarmowe, osłony fizyczne, układy zabezpieczające, itp. Niematerialnymi środkami redukcji ryzyka można określić te o charakterze organizacyjnym. Może być to np. zespół ludzi działający według odpowiednio ustalonych procedur postępowania (Gill, Kadziński 2011). Do tego typu środków można zaliczyć środki nazywane standardami bezpieczeństwa. Są to standardy formułowane przepisach, normach, regulaminach, itp. W ich ustalaniu wykorzystywana jest wiedza zdobyta przy identyfikowaniu zagrożeń i szacowaniu ryzyka (Studenski, 1996). Na rysunku 2 przedstawiono środki redukcji ryzyka dla próby nieautoryzowanego wlotu BSP nad obiekt. Konsekwencje niezadziałania żadnej z barier zaprezentowanych na rysunku 2 zidentyfikowano i zaprezentowano na rysunku 3.

Zidentyfikowano również bariery ochronne w przypadku aktywizacji zagrożeń czyli sytuacji kiedy znajdzie się w obszarze obiektu któremu zagraża (Gill, Kobaszyńska 2013). W celu uniknięcia zdarzenia niebezpiecznego (zdarzenie powodującego stratę) należy:

- po wykryciu BSP w obszarze analiz podjąć próby jego zniszczenia,
- zastosować osłony mechaniczne antywybuchowe,
- stosować łączność szyfrowaną na obszarze obiektu i okolicach,
- wykorzystać możliwości maskowania urządzeń w celu utrudnionej ich identyfikacji.



Rys. 2. Środki redukcji ryzyka dla próby nieautoryzowanego wlotu nad obiekt



Rys. 3. Konsekwencje dla nieautoryzowanego wlotu nad obiekt

Przedstawione działania zmierzają do zmniejszenia prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia niebezpiecznego. Środki redukcji ryzyka stosuje się również w celu minimalizowania start kiedy do zdarzenia dojdzie. Są to prace podejmowane w czasie projektowania środków transportu i infrastruktury. Przede wszystkim stosowanie trwałszych materiałów i ulepszania konstrukcji. W tej kategorii środków redukcji ryzyka należy uwzględnić również rozwój systemu ratownictwa (Kadziński, Gill 2016).

6. PODSUMOWANIE

Konsekwencje ataku należy rozpatrywać na czterech obszarach. Pierwszy obszar to konsekwencje polityczne. Konsekwencją udanego ataku terrorystycznego może być utrata społecznego zaufania do rządu państwa w którym doszło do ataku oraz zaostrzenie przepisów prawa ograniczające wolności obywatela (Szymańska, 2014). Przykładem konsekwencji może być upadek rządu José Marii Aznara w Hiszpanii. Przyczyną upadku była seria zamachów terrorystycznych przeprowadzony w Madrycie w dniu 11 marca 2004 roku na pociągi. Sprawcami zamachów byli terroryści z Al-Qaeda [Elmundo, 2006]. W wyniku zamachów wycofano także hiszpańskie wojska z Iraku. Drugi obszar to negatywne konsekwencje ekonomiczne. Konsekwencje ekonomiczne są trudne do oszacowania. Mogą być stosunkowo niewielkie, ale mogą też być bardzo znaczące. Konsekwencje te obejmują wydatki związane z przywróceniem funkcjonalności zaatakowanej instalacji, wypłatą odszkodowań, kosztami związanymi z potencjalną rekultywacją terenu. Przykładem strat finansowych związanych z działalnością terrorystyczną jest zakończenie inwestycji polegającej na budowie elektrowni jądrowej w Lemoniz, w Hiszpanii. Ataki terrorystyczne doprowadziły do wstrzymania inwestycji w 1984 roku (Markham et al. 1982). W przypadku lotnisk straty finansowe mogą wynikać z wstrzymania operacji startów i lądowań na zaatakowanym lotnisku. Atak na lotnisko Gatwick w Wielkiej Brytanii w dniach 19-21 grudnia 2018 spowodował straty finansowe wysokości ok. 50 milionów funtów (Wendt et al. 2020). Trzeci obszar to konsekwencje społeczne. Do konsekwencji tych należy zaliczyć wszelkie konsekwencje związane z utratą zdrowia przez bliskich ofiar. Ostatni obszar to konsekwencje ekologiczne i środowiskowe. Wartość tych konsekwencji jest trudna do oszacowania i zależna od skali kontaminacji, której przyczyną był zamach terrorystyczny.

LITERATURA

1. Wyszywacz W., 2020, Drony, Wydawnictwo Poligraf, Brzezia Łąka.
2. Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0947-20210805> (dostęp 20.05.2022).
3. Ustawa Prawo lotnicze, Dz. U. 2002 Nr 130 poz. 1112, Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r.
4. Łukasiewicz J., (2022), Bezzałogowe statki powietrzne jako źródło zagrożeń infrastruktury zaopatrzenia państw w energię elektryczną oraz proponowane metody ochrony tej infrastruktury, *Terroryzm: studia, analizy, prewencja*, nr 1 (1), s. 90-122.
5. Urzędu Lotnictwa Cywilnego Wytoczne nr 7 Prezesa z dnia 9 czerwca 2021 r. w sprawie sposobów wykonywania operacji przy użyciu systemów bezzałogowych statków powietrznych w związku z wejściem w życie przepisów rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) nr 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r.
6. Urzędu Lotnictwa Cywilnego Wytoczne nr 24 Prezesa z dnia 30 grudnia 2020 r. w sprawie wyznaczania stref geograficznych dla systemów bezzałogowych statków powietrznych, https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/78/akt.pdf, (dostęp 10.05.2022).
7. Safi M., Borger J., (2019), How did oil attack breach Saudi defences and what will happen next?. *The Guardian*, Retrieved 18 November 2019.
8. Łukasiewicz J., Piekarski M., Kluczyński M., (2022) Polish Association For National Security Of Critical Infrastructure Against Threats From Unmanned Platforms, Vol. II, 33 <https://drive.google.com/file/d/1hCHNae2847TwpHQjE-KcBwAI4Sre-Dt4Y/view> (dostęp 1.02.2022).
9. Jones J.S., (2021) Likely drone attack on Pennsylvania substation, (dostęp 1.05.2022).
10. Aramco's Repairs Could Take Months Longer Than Company Anticipates, Contractors Say, *The Wall Street Journal*. <https://www.wsj.com/articles/aramcos-repairs-could-take-months-longer-than-company-anticipates-contractors-say-11569180194>, (dostęp 30.04.2022).
11. Reuters, Greenpeace crashes Superman-shaped drone into French nuclear plant <https://www.reuters.com/article/uk-france-nuclear-greenpeace-idUKKBN1JT17G> (dostęp 30.04.2022).
12. IEA, <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/nuclear> (dostęp 30.04.2022).
13. Barrett Brian, WIRED.com, A Drone Tried to Disrupt the Power Grid. It Won't Be the Last, <https://www.wired.com/story/drone-attack-power-substation-threat/> (dostęp 30.04.2022).
14. <https://www.dji.com/pl/flysafe> (dostęp 30.04.2022).
15. Rządowe Centrum Legislacji <https://legislacja.rcl.gov.pl/projekt/12350601/katalog/12811945> (dostęp 30.04.2022).
16. Went P., Voltes-Dorta A., Suau-Sanchez P., Estimating the costs for the airport operator and airlines of a drone-related shutdown: an application to Frankfurt international airport, *J Transp Secur.* 2020 Jul 8 s.1–24.
17. Markham J., M., Special To the New York Times, Spain gets warning on basque nuclear plant <https://www.nytimes.com/1982/02/18/world/spain-gets-warning-on-basque-nuclear-plant.html>, (dostęp 30.04.2022).

18. Elmundo, <http://www.elmundo.es/documentos/2006/04/11/autohtml/index.html?cual=1412>, (dostęp 30.04.2022).
19. Szymańska M., (2014), Eksplozja terroryzmu w USA a przekształcenia w amerykańskich służbach specjalnych po 11 września 2001 r, Przegląd Bezpieczeństwa Wewnętrznego, nr 10 (6).
20. Al-Rifaie H., Studziński R., Gajewski T., Malendowski M., Sumelka W., Sielicki P.W., (2021) A New Blast Absorbing Sandwich Panel with Unconnected Corrugated Layers—Numerical Study, *Energies*, vol. 14, no. 1, s. 214-1-214-23.
21. Forsal, <https://forsal.pl/biznes/energetyka/artykuly/8320282,elektrownia-atomowa-w-polsce-lubiatowo-kopalino-lokalizacja.html>, (dostęp 30.04.2022).
22. The National Interest (2021) Chinese Engineers Shot Down a Large Drone Using an Electromagnetic Pulse, Available at: <https://nationalinterest.org/blog/buzz/chinese-engineers-shot-down-large-drone-using-electromagnetic-pulse-192571> (dostęp 1.02.2022).
23. Solidakis G.N., (2017) An Arduino-based subsystem for controlling UAVs through GSM*, 2017 6th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), s. 1-4.
24. Wyant R.T., (2016), Skynet is real! An anti-drone round. *Small Arms Def J.*, 8. Available: <http://www.sadefensejournal.com/wp/?p=3752>, (dostęp 30.04.2022).
25. Wu Y., Sui Y., Wang g., (2017) Vision-Based Real-Time Aerial Object Localization and Tracking for UAV Sensing System, in *IEEE*, vol. 5, pp. 23969-23978.
26. Maestre N. del Rey, Mata-Moya, D., Jarabo-Amores, M., Gomez-del-Hoyo P., Rosado-Sanz J., (2019), Optimum Beamforming to Improve UAV's Detection Using DVB-T Passive Radars', 2019 International Radar Conference (RADAR), s. 1-6.
27. TheDefencePost, <https://www.thedefensepost.com/2022/04/06/raytheon-laser-counter-drone-system>, (dostęp 30.04.2022).
28. Sahnoudi M., Amin, M.G., (2009), Robust tracking of weak GPS signals in multipath and jamming environments, *Signal Processing*, Volume 89, Issue 7, s. 1320-1333.
29. Schäffer B., Pieren R., Heutschi K., Wunderlin J. M., Becker S., (2021), Drone Noise Emission Characteristics and Noise Effects on Humans-A Systematic Review. *International journal of environmental research and public health*, 18(11), 5940.
30. Gill A., Kadziński A. (2011), Klasyfikacje środków redukcji ryzyka zagrożeń w warstwowych modelach systemów bezpieczeństwa w transporcie, *Logistyka* 3/2011 s. 1-8.
31. Kadziński A., Gill A. (2016), Rejestr zagrożeń, *Bezpieczeństwo i Ekologia*, *Autobusy* 2/2016 s.158-161.
32. Kadziński A., Gill A. (2009), Integracja pojęć (podrozdział 7.3.2). W: praca zbiorowa R. Krystek (red.), *Zintegrowany system bezpieczeństwa transportu*, tom 2. Uwarunkowania rozwoju integracji systemów bezpieczeństwa transportu. Politechnika Gdańska, WKŁ, Warszawa 2009, s. 285-288.
33. Kobaszyńska-Twardowska A., Gill A. (2013), Zastosowanie analizy bow-tie do identyfikacji warstw ochronnych w systemach bezpieczeństwa, *Technika transportu szynowego TTS* 10/2013, s.2287-2294.
34. Studenski R., 1996, *Organizacja bezpiecznej pracy w przedsiębiorstwie*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.

**ANALYSIS OF THE SEQUENCE OF EVENTS DURING AN ATTACK ON A
CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECT CONDUCTED WITH THE USE OF AN
UNMANNED AERIAL VEHICLE**

Abstract

Unmanned aerial vehicles are a source of threats to facilities important for state security, including critical infrastructure facilities. Every day media reports indicate that these ships, due to their functional features, are more and more often used in attacks both against people, including politicians, and industrial facilities. The analysis of the sequence of events from the moment the drone takes off until the end of the attack, as well as learning about the methods of detection, neutralization and prevention methods can be the basis for developing procedures in the event of an unmanned attack by critical infrastructure operators, and thus contribute to limiting the possible consequences of the attack .

Keywords: critical infrastructure, unmanned aerial vehicles, attack sequence.

Dariusz ŁUKOWSKI*

ENERGETYKA ROZPROSZONA JAKO ELEMENT BUDOWY ODPORNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA ENERGETYCZNEGO INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ

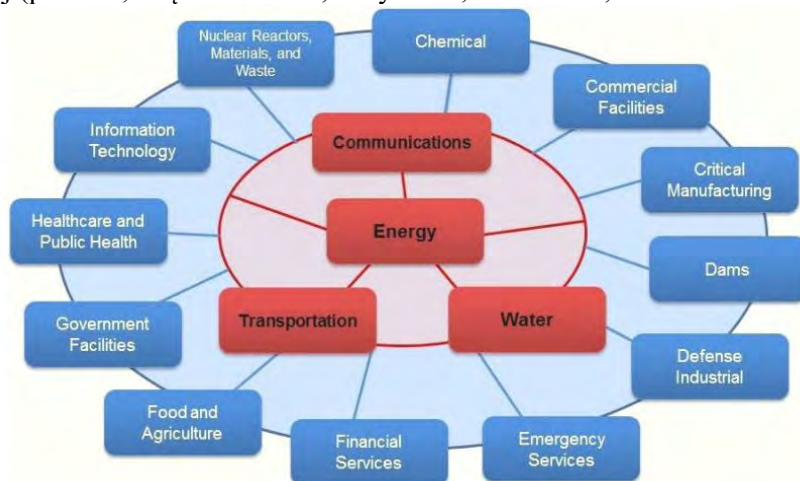
Zasilanie energią elektryczną infrastruktury państwa w sposób ciągły, przy zachowaniu odpowiedniej wartości jej parametrów jest podstawowym kryterium zapewnienia bezpieczeństwa funkcjonowania państwa i jego obywateli. Ostatnie wydarzenia na terenie Ukrainy i zachwianie porządkiem bezpieczeństwa europejskiego uwypukliły znaczenie bezpieczeństwa energetycznego w naszym regionie. Polska nie wytwarza wystarczającej ilości nośników energii z własnych źródeł i tak jak wiele innych krajów europejskich uzależniona jest od dostaw z zewnątrz. Sposób ich pozyskania powinien zagwarantować nieprzerwany dostęp, niezależnie od uwarunkowań politycznych, stąd ważna jest dywersyfikacja dostaw. Zapewnianie ustawicznych dostaw surowców energetycznych nie jest jedynym czynnikiem wpływającym na bezpieczeństwo zasilania infrastruktury krytycznej kraju. Ważna jest sprawność i nieprzerwana praca obiektów wywarzających energię oraz systemów dystrybucyjnych (w tym fizycznych sieci przesyłowych oraz systemów nadzoru i kontroli). W przypadku systemów energetycznych pojęcie dywersyfikacja odnosi się nie tylko do nośników, ale również sposobów jej wytwarzania, oraz budowy zdecentralizowanego, systemu dystrybucji. W pierwszym przypadku mówimy o alternatywnych źródłach pozyskania energii (w tym energii odnawialnej), a w drugim o budowie sieci o dużej gęstości i strukturze modułowej (klastrowej) wykorzystującej zaawansowane technologie z obszaru inteligentnych sieci i systemów pomiarowych. Często stosowanym pojęciem określającym te rozwiązania jest termin energetyka rozproszona. Niezależnie od podejmowanych działań mamy do czynienia, ze stałym trendem wzrostu kosztów wytwarzania energii i potrzebą efektywniejszego jej zużycia przez odbiorców.

Słowa kluczowe: klastry energetyczne, rozproszone źródła energii, mikrosieci, energetyka rozproszona, infrastruktura krytyczna, magazyny energii, systemy przesyłowe, systemy dystrybucyjne, odnawialne źródła energii, odporność energetyczna, system zarządzania energią.

* Biuro Bezpieczeństwa Narodowego

1. SYSTEM ENERGETYCZNY JAKO CENTRALNY ELEMENT INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ.

Wojna w Ukrainie pokazała, że elementy systemu energetycznego stanowią grupę tzw. lukratywnych celów w ramach operacji wojennych. Działania te mają podwójne znaczenie: osłabiają morale społeczeństwa (brak poczucia bezpieczeństwa), ograniczają zdolność państwa do właściwej reakcji na zagrożenia. Trzeba pamiętać, że w odróżnieniu od innych nośników energii (gaz, energia cieplna), energia elektryczna na poziomie odbiorców indywidualnych i instytucjonalnych jest trudna do zastąpienia, a jej brak poważnie ogranicza funkcjonowanie gospodarstw domowych. Według danych Departamentu Bezpieczeństwa Narodowego USA w 2015 roku 79,32% wszystkich ataków cybernetycznych koncentrowało się na systemie energetycznym [1]. W ataku cybernetycznym na Ukrainę w 2015 r., hakerzy zdołali przejąć kontrolę i wyłączyć zasilanie w 43 podstacjach energetycznych [2], a w 2016 r. udało się wyłączyć stację przesyłową na północ od Kijowa, redukując pięciokrotnie poziom zasilania dla miasta przez pełną godzinę [3]. Wynika z tego, że aby wyeliminować lub zakłócić funkcjonowanie dowolnego obiektu infrastruktury specjalnej, wystarczy go izolować na stałe lub czasowo od źródła zasilania, a więc zaatakować go za pośrednictwem systemu energetycznego. Rysunek pierwszy ilustruje przykład współzależności między energetyką, a piętnastoma innymi sektorami krytycznymi, w tym: telekomunikacją, zaopatrzeniem w wodę oraz transportem. Podobnie jak energetyka obszary te stanowią kluczowe źródła energii wzajemnie się uzupełniając [4]. System ten może być zaatakowany celowo (atak o charakterze kinetycznym, sabotaż, cyberatak) lub ulec zniszczeniu w wyniku katastrofy naturalnej (powódź, trzęsienie ziemi, silny wiatr, oblodzenia, osuwiska ziemne).



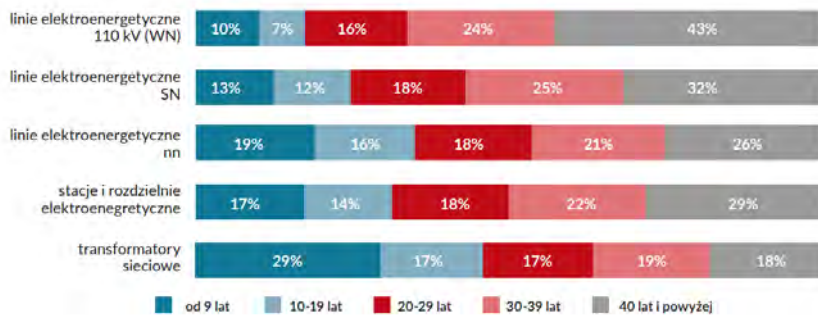
Rys. 1. Współzależność między energetyką a piętnastoma innymi sektorami krytycznymi

W strategii zapewnienia odporności infrastruktury krytycznej muszą zostać uwzględnione powyższe uwarunkowania. W niniejszym artykule skoncentruję się na znaczeniu energetyki rozproszonej w budowie odpornego i niezawodnego systemu zasilania obiektów ważnych z punktu widzenia bezpieczeństwa narodowego.

2. CZYNNIKI OSŁABIAJĄCE ODPORNÓĆ SYSTEMU ENERGETYCZNEGO

Jednym z kluczowych elementów wpływających na bezpieczeństwo energetyczne kraju jest gęstość sieci energetycznej liczonej w stosunku do średniej gęstości zaludnienia. Średnia gęstość zaludnienia w Polsce wynosi 122 osoby/km² [5]. Na jeden tysiąc kilometrów kwadratowych przypada 41 km sieci energetycznej. Dla porównania w Niemczech jest to 100 km, a w Szwajcarii nawet 161 km [6]. Wynika z tego, że na 1 km² w Polsce przypada 0,041 km sieci energetycznej, która średnio zabezpiecza wspomniane wyżej 122 osoby. Te dane wskazują na bardzo słabe możliwości bezpiecznego transferu i dystrybucji energii w naszym kraju, z możliwością wyznaczania obejść i alternatywnych dróg przesyłu w momencie jej uszkodzenia.

Istotnym zagrożeniem, w kontekście wyżej opisanej gęstości sieci, jest ryzyko związane z awariami będącymi skutkiem niedoinwestowania i starzenia się infrastruktury przesyłowej. Na rysunku drugim przedstawiono strukturę wiekową infrastruktury dystrybucyjnej w Polsce według danych uzyskanych od skontrolowanych przez NIK Operatorów Systemów Dystrybucyjnych w 2017 r [7].

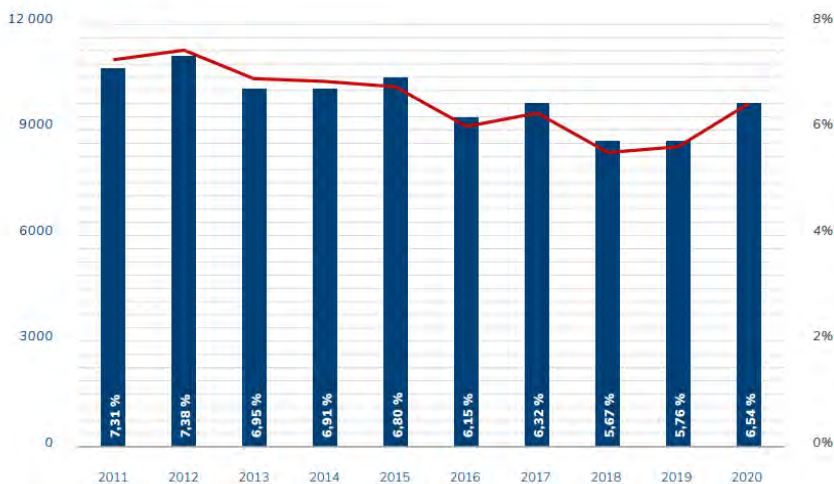


Rys. 2. Struktura wiekowa infrastruktury dystrybucyjnej w Polsce

Jak widać linie elektroenergetyczne cechują się dość niskim stopniem nowoczesności. Około 70% jest starsze niż 30 lat. Najlepiej struktura sieciowa przedstawia się w transformatorach sieciowych. Odporność sieci osłabia również fakt, że w większości są to linie napowietrzne. W 2019 roku tylko 27,6% sieci średniego napięcia i 35% niskiego napięcia była skablowana [8] i jest to jeden z najniższych wskaźników w Europie. W roku 2020 dla sieci średniego napięcia, mających największy udział w dystrybucji energii, nastąpił przyrost linii kablowych zaedwie

o 0,77%. Średnie okablowanie w UE linii przesyłowych wynosi około 50%, a my ten poziom osiągniemy najwcześniej w 2040 r [9]. W połączeniu z wiekiem sieci przesyłowych, powoduje to bardzo słabą odporność na awarie i oddziaływanie czynników zewnętrznych. Trzeba pamiętać, że elektroenergetyczne sieci przesyłowe i sieci dystrybucyjne stanowią serce każdego systemu infrastruktury krytycznej i są najbardziej narażone na niekontrolowane oddziaływanie z zewnątrz. W latach 2010-2014 najczęstszą metodą ataku na tą infrastrukturę były ataki bombowe (74% wszystkich ataków), a dalej podpalenia i taktyka sabotażu [10]. Szczególnie dotkliwie są ataki na stacje i rozdzielnie elektroenergetyczne i transformatory. Ich wymiana nie jest prosta i może oznaczać długotrwałe zakłócenia w dostawach energii elektrycznej. Mamy zatem kolejny element niskiej odporności systemu dystrybucji wynikający z jej wieku oraz podatności na atak.

Analizując te dane należy stwierdzić, że obecnie w Polsce ryzyko związane z bezpieczeństwem zasilania infrastruktury krytycznej w energię elektryczną jest stosunkowo wysokie, stąd należy podjąć działania eliminujące bądź w dużym stopniu minimalizujące zidentyfikowane zagrożenia.



Rys. 3. Straty techniczne i handlowe w Polsce wynikające z przesyłu energii na duże odległości

Ponadto, w dotychczasowym, klasycznym układzie sieci elektroenergetycznej źródła wytwarzania energii na skalę przemysłową ulokowane były w lokalizacjach związanych z wydobywaniem surowców. Miejsce wytwarzania i odbioru energii przez konsumentów były różne i wymagały jej przesyłu na duże odległości. Wraz z przepływem energii przez sieci związane są straty. Na rysunku trzy przedstawiono straty techniczne i handlowe z tego tytułu poniesione w latach 2011-2020. W roku 2020 straty te wyniosły prawie 10 TWh, co stanowi 6,5 % energii wprowadzonej do sieci [11].

3. KORZYŚCI WYNIKAJĄCE Z ZASTOSOWANIA ENERGETYKI ROZPROSZONEJ

W tych uwarunkowaniach jedną z metod zwiększających odporność i bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej jest zastosowanie rozwiązań z zakresu energetyki rozproszonej, czyli budowa tzw. klastrów energetycznych. Jest to główny powód wdrażania tego typu rozwiązań w krajach wysoko rozwiniętych. Klastry mogą mieć zróżnicowaną strukturę. Mogą być pojedynczą mikrosiecią (MS), grupą MS lub posiadać strukturę hybrydową stanowiącą kombinację MS, rozproszonych źródeł energii (farmy wiatrowe, farmy fotowoltaiczne) i odbiorników.

Energetyka rozproszona umożliwia zwiększenie odporności i poprawę efektywności energetycznej, głównie ze względu na wykorzystanie nowych metod do lokalnego wytwarzania energii oraz zarządzania nią. Metody te opierają się o zastosowanie OZE (wiatr, woda, energia słoneczna, biomasa), czy też nowoczesnych technologii takich jak ogniwa paliwowe, mikro generatory energii atomowej w połączeniu z całą gamą nowoczesnych i stale rozwijanych zasobników energii.

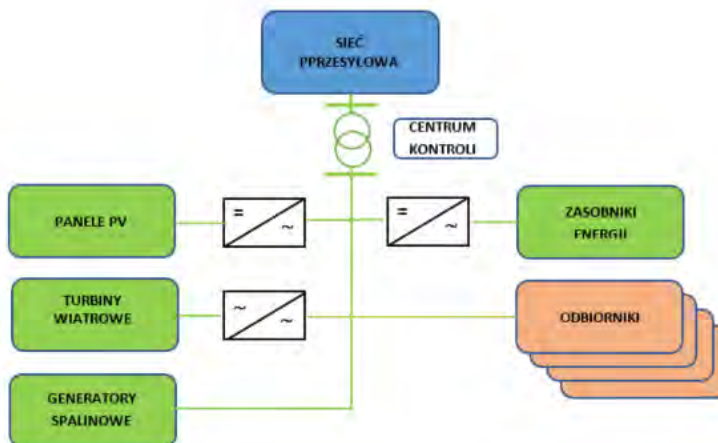
System taki wymaga zastosowania technologii inteligentnych, które pozwolą na bezpieczne połączenie sieci przesyłowych z klastrami pracującymi w oparciu o źródła rozproszone, często mniej stabilne (słońce i wiatr). Realizacja tego zadania wymaga szeregu działań na następujących poziomach:

- państwo: stworzenie odpowiednich warunków prawnych;
- operatorzy systemów dystrybucyjnych: rozwój sieci, inteligentne opomiarowanie, automatyzacja, systemy informatyczne, bilansowanie lokalne (klastrów energetycznych);
- odbiorcy (użytkownicy infrastruktury specjalnej): definiowanie potrzeb i ryzyk, optymalizacja zużycia energii, inwestycje w nowoczesne rozwiązania (mikrosieci) w celu bilansowania energii w klastrze.

MS, jako kluczowy element klastrów energetycznych, stanowi podstawowy element składowy inteligentnych systemów zasilania. Koncepcja MS w sposób znaczący zwiększa odporność, niezawodność oraz efektywność działania systemu zasilania z wykorzystaniem rozproszonych źródeł oraz zasobników energii tworząc warunki do zapewnienia zasilania dla krytycznych, z punktu widzenia funkcjonowania danej instalacji odbiorników. W przypadku objęcia klastrami elementów infrastruktury krytycznej (np. ważne instalacje wojskowe takie, jak lotniska, centra dowodzenia, rozpoznania, czy też instalacje paliwowe) zwiększa się ich zdolność do przetrwania i realizacji zadań zgodnie z przeznaczeniem. Dodatkowo zdolność ta wzrasta, jeśli MS może funkcjonować zarówno w trybie przyłączenia do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej lub innych klastrów, jak i w trybie wyspowym (czyli funkcjonowania w warunkach całkowitego odcięcia od zewnętrznej sieci dystrybucyj-

nej). Funkcjonowanie takiego systemu wymaga budowy zaawansowanych systemów kontroli pracy obejmujących: integrację różnych elementów zasilających, zarządzanie przepływem energii z różnych źródeł oraz optymalizację pracy całego systemu zasilania. Jedną z szeroko przyjętych definicji w ramach projektów badawczych UE określa mikrosieci jako: „ elektroenergetyczne sieci dystrybucji niskiego napięcia obejmujące rozproszone źródła energii (takie jak mikro turbiny fotowoltaika, ogniwa paliwowe itd.) wraz z urządzeniami przechowującymi energię (koła zamachowe, zasobniki energii lub baterie) i kontrolowanymi obciążeniami. Takie systemy mogą funkcjonować w sposób nieautonomiczny, jeśli są podłączone do sieci zewnętrznej lub w trybie autonomicznym, kiedy są od niej odłączone. Funkcjonowanie źródeł w takiej sieci może przynieść znaczące korzyści dla funkcjonowania całego systemu, jeśli w sposób efektywny są zarządzane i koordynowane.” [12].

Z całą pewnością można stwierdzić, że tego typu lokalne systemy dystrybucyjne tracą tradycyjny pasywny charakter, ponieważ przejmują one funkcje zarządzania i dystrybucji energii, w tym również w kierunku do zewnętrznej sieci dystrybucyjnej lub innych klastrów energetycznych, tworząc swojego rodzaju mozaikę powiązanych ze sobą komórek. W przypadku wystąpienia zagrożeń zewnętrznych są zdolne do przejścia w tryb autonomiczny i odłączenia się od zewnętrznej sieci ograniczając transmisję zakłóceń, czy awarii. Zdolność do odłączenia jest kluczowym elementem zwiększenia odporności infrastruktury krytycznej funkcjonującej w ramach klastra. Jednocześnie architektura zarządzania i kontroli klastrami tworzy wiele wyzwań związanych z zapewnieniem stabilności mocy oraz częstotliwości energii pozyskiwanej z rozproszonych i niestabilnych źródeł. Na rysunku czwartym przedstawiono prostą strukturę mikrosieci.



Rys. 4. Uproszczona struktura mikrosieci

MS można podzielić na typy w zależności od przeznaczenia. Mogą zasilac instalacje wojskowe, krytyczne z punktu widzenia obiekty przemysłowe, czy też ważne

obiekty rządowe i użyteczności publicznej takie jak szpitale, centra łączności, wodociągi, chłodnie spożywcze, czy bazy paliwowe. Doskonałym przykładem struktury kluczowych obiektów infrastruktury krytycznej jest omawiany wcześniej schemat zobrazowany na rysunku pierwszym. Oczywiście wielkość MS może być zróżnicowana w zależności od typu i zapotrzebowania na moc konkretnego obiektu infrastruktury krytycznej. Małe i nieskomplikowane MS obejmujące np. pojedynczy budynek mogą mieć moc od kilkudziesięciu do setek kW, a duże, takie jak obiekty przemysłowe, czy instalacje wojskowe, nawet do kilku MW.

Mówiąc o energetyce rozproszonej można mieć na uwadze nie tylko wiele połączonych MS w ramach sieci dystrybucyjnej, ale również rozproszoną generację i kontrolowane obciążenia w ramach większej struktury sieci średnich napięć. Sposób zarządzania i kontroli nad tego typu strukturami jest inny niż w ramach MS. Połączenie dwóch lub więcej MS ze sobą, z możliwością zarządzania taką strukturą i transferu zasilania między nimi oraz z siecią dystrybucyjną jeszcze bardziej zwiększa odporność i niezawodność wszystkich elementów składowych takiego klastra. Jest ona znacznie lepsza niż w przypadku wielu MS podłączonych do sieci dystrybucyjnej niezależnie od siebie [13]. MS w takiej strukturze mogą pozyskać energię od innych, a także przyspieszyć usuwanie awarii w systemie dystrybucji przez przejście w tryb autonomiczny (wyspawy). Po usunięciu przyczyny zakłóceń, energia z MS może przyspieszyć proces podnoszenia (uruchomienia) sieci i zabezpieczenia z niej zasilania krytycznych odbiorników. Zasięg oraz czasokres trwania przerw w zasilaniu stanowi kluczowy parametr pomiarowy do określania odporności i niezawodności systemów energetycznych. W tak zintegrowanym złożonym z wielu MS (posiadających własne mikro źródła) w ramach lokalnej sieci dystrybucyjnej klastrze, mogą znajdować się inne źródła energii rozproszonej (np. farmy wiatrowe i fotowoltaiczne) włączone w sieć dystrybucyjną średnich napięć. Dobrze skonstruowane systemy zarządzania energią w takich zintegrowanych klastrach pozwalają na właściwą koordynację i sterowanie wszystkimi źródłami, w sposób pozwalający ograniczyć negatywne skutki wynikające z niestabilności niektórych odnawialnych źródeł energii w poszczególnych MS. Podobnie można sterować zainstalowanymi w klastrze zasobnikami energii. W warunkach szczytowego zapotrzebowania na moc w jednej z MS można przekierować energię z magazynów energii innych MS, reagując w ten sposób na zmiany w zapotrzebowaniu odbiorców w ramach połączonej struktury sieci. Tworzenie zintegrowanych MS w ramach jednej sieci obniża koszty generowanej energii. Przy zastosowaniu odpowiedniej strategii planowania oraz zasad transferu energii w ramach takiej sieci można zredukować całkowite koszty operacyjne o 13,2%, a koszty dla pojedynczej MS nawet o 29,4% [14].

Systemy zarządzania energią w zintegrowanych, składających się z wielu MS klastrach są przedmiotem badań i rozwoju w wielu krajach. Struktura wewnętrzna takich klastrów, jak i strategia zarządzania może być różnorodna. Generalnie architektura klastra złożonego z pewnej liczby MS dzieli się na trzy kategorie:

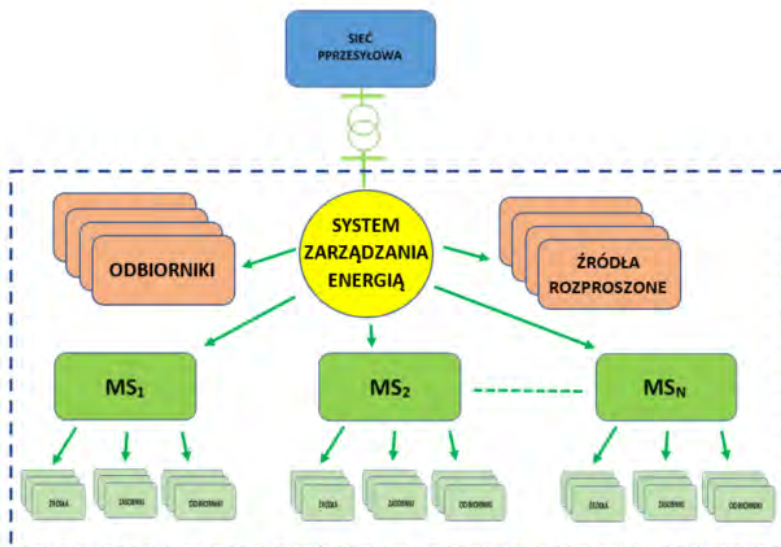
- serii MS podłączonych szeregowo do pojedynczej sieci dystrybucyjnej;

- MS podłączone równolegle do pojedynczej sieci dystrybucyjnej;
- powiązanych między sobą MS podłączonych do wielu linii sieci dystrybucyjnej.

Pod względem przyjętej strategii kontroli MS w klastrach dystrybucyjnych przyjmuje się następujący podział:

- każdy z każdym (peer-to-peer) – duża autonomia MS, brak centralnego kontrolera w klastrze;
- nadrzędny-podległy (master-slave);
- kontrola hierarchiczna;
- kontrola rozproszona.

Z punktu widzenia ochrony infrastruktury krytycznej, najlepszą w tym przypadku jest strategia każdy z każdym, w której zachowana jest największa autonomia działania poszczególnych MS (w tym wchodzących w skład infrastrukturą krytycznej) i nie ma potrzeby transferu danych wrażliwych MS w ramach klastra. Wybór architektury i strategii zarządzania zależy od wagi oczekiwanych efektów. Może to być nacisk położony głównie na zwiększenie odporności i niezawodności działania lub na poprawę efektywności zasilania i obniżenie kosztów inwestycyjnych. Może to być również rozwiązanie optymalizujące wszystkie czynniki docelowe. Na rysunku 5 poniżej przedstawiono ogólny schemat poglądowy klastra w systemie dystrybucyjnym składającym się z N mikrosieci (każda w strukturze przedstawionej wcześniej), lokalnych źródeł rozproszonych w obrębie klastra sieci dystrybucyjnej, odbiorców energii poza MS oraz systemu zarządzania energią w klastrze.



Rys. 4. Schemat poglądowy klastra składający się z N mikrosieci

System zarządzania energią w klastrze ma za zadanie poprawić efektywność ekonomiczną i jakość zasilania w systemie. Zapewnia zasilanie dla MS, a nadmiar energii wytworzonej w ramach MS przekazuje bezpośrednio do systemu dystrybucyjnego (do odbiorców podłączonych bezpośrednio w ramach sieci dystrybucyjnej klastra) lub innych MS przyłączonych w ramach klastra. Na poziomie MS centra kontroli monitorują i dbają o bilans energii, optymalizują wykorzystanie zasobników energii, kontrolują napięcie i częstotliwość zasilania. Słabością systemu opartego na klastrach jest duża ilość rozproszonych systemów sterowania, które bez wprowadzenia określonych wymagań i standardów oraz kontroli mogą być podatne na ataki cybernetyczne. Dzisiejsze aplikacje do sterownia rozproszonymi źródłami energii to wyroby komercyjne, ogólnodostępne na rynku, bez weryfikacji pod kątem odporności na próby hakowania. Inteligentne systemy pomiarowe również mogą charakteryzować się niską odpornością na incydenty. Zastosowanie tych rozwiązań na potrzeby budowy systemu zasilania dla obiektów infrastruktury krytycznej wymaga szczególnej koncentracji wysiłku na weryfikacji zastosowanych technologii, analizie ryzyka i kontroli urządzeń automatyki i sterowania.

Dodatkowym potencjalnym ograniczeniem jest połączenie MS dedykowanych do zasilania obiektów o różnym przeznaczeniu, we wspólnie zarządzany klaster. W przypadku infrastruktury krytycznej włącznie się w klaster z innymi (np. komercyjnymi) MS oznacza udostępnienie wielu danych (często o charakterze wrażliwym) do nadrzędnego elementu zarządzającego. Jakość komunikacja i zarządzania w klastrze decyduje o odporności całego systemu. W strukturze rozproszonej podatność na atak jest potencjalnie większa niż w tradycyjnej sieci dystrybucyjnej ponieważ można go dokonać poprzez najsłabiej chronioną MS i spowodować niestabilność całego systemu.

4. WNIOSKI

Zastosowanie rozwiązań energetyki rozproszonej, a zwłaszcza klastrów wielu MS, wraz rozwojem technologii dystrybucji, magazynowania i sprawności rozproszonych źródeł energii może w znacznym stopniu poprawić odporność energetyczną infrastruktury sieci dystrybucyjnej. W perspektywie bliższej rozwiązanie to zapewni zwiększoną odporność kluczowej infrastruktury specjalnej, a w perspektywie dalszej pozwoli zbudować odporność społeczną (odbiorców indywidualnych). Ograniczanie działań wyłącznie do ochrony fizycznej obiektów, nawet przy wykorzystaniu zaawansowanych technologii wspierających nie chroni ich przed wszystkimi zagrożeniami. Zalety proponowanego rozwiązania są następujące:

- zapewnienie zasilania na poziomie minimalnym, niezbędnym do realizacji zakładanych funkcji w obiektach infrastruktury krytycznej;

- umożliwienie szybszego podniesienia systemu dystrybucyjnego po usunięciu przyczyny awarii/przerwy zasilaniem dla MS;
- uodpornienia instalacji na zagrożenia zewnętrzne i zwiększenie ich niezawodności;
- stwarzanie warunków do optymalizacji zużycia energii;
- obniżenie kosztów funkcjonowania obiektu znajdującego się w systemie;
- ograniczenie strat przesyłu energii;
- ograniczenie emisji CO₂.

Ich wdrożenie w pierwszej fazie realizacji wymaga przygotowania odpowiednich kadr, budowy świadomości i środków inwestycyjnych. Niezbędna jest również weryfikacja stosowanych narzędzi, urządzeń i procedur pod względem bezpieczeństwa cybernetycznego i zastosowanego oprogramowania. Dzisiejsze zagrożenia i ograniczenia dla rozwoju systemów rozproszonych wynikają z potrzeby wdrażania nowych, zaawansowanych technologii zarządzania i kontroli oraz rozwoju źródeł odnawialnych, zwłaszcza o wysokiej wydajności, oraz magazynów energii. Przedstawiona propozycja ogranicza również uzależnienie od surowców energetycznych pozyskiwanych spoza terytorium kraju. Zagrożeniem jest to, że szeroko rozpowszechniona digitalizacja wymaga zastosowania w produkcji krytycznych materiałów (np. metali ziem rzadkich), które są znacznie mniej dostępne niż kopalne źródła energii i skupiają się w kilku krajach. Ryzyko to może być jednak w coraz większym stopniu ograniczane przez coraz szerszą dostępność i rosnącą jakość substytutów oraz rosnący poziom recyclingu.

LITERATURA

1. Amjad Anvari-Moghaddam, Hamdi Abdi, Behnam Mohammadi-Ivatloo, Nikos Hatziargyriou; Microgrids. Advances in Operation, Control, and Protection; Springer Nature Switzerland AG 2021; <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59750-4>
2. BBC news, “Ukraine power cut 'was cyber-attack'”, January 2017, <http://www.bbc.com/news/technology-38573074>
3. Christine Schwaegerl, Liang Tao, The Microgrids Concept; https://media.wiley.com/product_data/excerpt/87/11187206/1118720687-7.pdf; dostęp: 05.04.2022
4. Czyżak Paweł, Wrona Adrianna, Sieci dystrybucyjne i elektromobilność. Planowanie i rozwój; <https://www.forumenergii.eu/public/upload/articles/files/Sieci%20dystrybucyjne.%20Planowanie%20i%20rozw%C3%B3j.pdf>; wejście 18.04.2022
5. Defending the European Energy Infrastructures, Critical Infrastructure Protection: Prevention, detection, response and mitigation of the combination of physical and cyber threats to the critical infrastructure of Europe, The H2020-740898 DEFENDER project;

- <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b7096f83&appId=PPGMS>, dostęp: 25.04.22
6. Główny Urząd Statystyczny, <https://stat.gov.pl/obszarytematyczne/ludnosc/ludnosc/ludnosc-stand-i-struktura-ludnoscioraz-ruch-naturalny-w-przekroju-terytorialnym-stand-w-dniu-30-06-2021,6,30.html>, dostęp: 18.04.2022.
 7. H2020 700416, SUCCESS project, "Securing Critical Energy Infrastructures," <http://www.successenergy.eu/>
 8. Justinas Jasiunas, Peter D. Lund, Jani Mikkola; Energy System Resilience – A Review; Renewable and Sustainable Energy Reviews; 150(2021)111476;
 9. Liu, G., Starke, M.R., Ollis, B., & Xue, Y. (2016); Networked Microgrids Scoping Study. Oak Ridge National Laboratory (ORN/TM-2016/294)
 10. Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Energetyka dystrybucja i przesył, 2020, http://www.ptpiree.pl/raporty/2020/raport_ptpiree_druk.pdf.
 11. Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Energetyka dystrybucja i przesył, 2021, http://raport.ptpiree.pl/raporty/2021/raport_ptpiree_2021.pdf
 12. Ukrainian Ministry of Energy and Coal, "The Work Group to Study the Causes of the Temporary Malfunction of Power Supply Companies, which took place on December 23, 2015," January 2016. Available: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control-publish/article?art_id=245082298
 13. United Nations Security Council, "Physical protection of critical infrastructure against terrorist attacks," Counter Terrorism Committee Executive Directorate, United Nations Security Council TRENDS REPORT, 8 March 2017 <https://www.un.org/sc/ctc/wp-content/uploads/2017/03/CTEDTrends-Report-8-March-2017-Final.pdf>
 14. Zakrzewska S., Gil-Świdorska A. & P. Szmitkowski, Struktura wiekowa polskiej infrastruktury energetycznej, 2020, https://www.cire.pl/pliki/2/2020/str_wiek.pdf

DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS AS RESILIENCE AND SECURITY DESIGN ELEMENT FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE

Abstract

Security and resilience of energy distribution systems powering critical infrastructure has significant impact on the overall performance of the state and society. This article indicates current risks coming from deterioration of geopolitical situation around Poland for our energy system. Density and age of distribution lines, are negative factors influencing security aspects. As the response to these threats solution based on distributed energy systems has been introduced. Energy clusters within distribution systems composed of microgrids (MG), distributed energy generation (including renewable energy sources), controlled loads, energy storage systems and energy management system may significantly improve the situation. Utilization of adequate energy management strategy and cluster architecture will reduce vulnerability of the distribution system as a whole together with single MS element within structure. Benefits coming from such approach may also include reduction of energy cost, quality

of distributed energy, power delivery adequate for basic function performance of critical infrastructure inside MS and critical loads sustainment. In general it will improve resilience and reliability of the energy network. The most sensitive part of the solution concerns distributed IT software resilience against cyber-attacks, that has to be taken into account while designing such solutions.

Keywords: Energy clusters, distributed energy generation, microgrids, distributed energy systems, critical infrastructure, energy storage systems, main grid, distribution grid, renewable energy sources, energy resilience, energy management system.

Marta MACIEJEWSKA*
Jakub BŁAŻEJÓW*
Marta GALANT-GOŁĘBIEWSKA*
Barbara MIKA*

WPLYW DEFICYTU SNU NA STAN PSYCHOFIZYCZNY PILOTA W TRAKCIE LOTU SYMULOWANEGO

Zapewnianie bezpieczeństwa w trakcie operacji lotniczej jest kluczowe dla transportu lotniczego. Szacuje się, że w dzisiejszych czasach między 70% a 80% zdarzeń w lotnictwie cywilnym jest spowodowanych przez czynnik ludzki. Dowódcą statku powietrznego jest osobą decyzyjną i odpowiedzialną za bezpieczeństwo na pokładzie. Nieustanne zaburzanie rytmu dobowego i zakłócenia orientacji dobowej organizmu mają negatywny wpływ na zdolności poznawcze człowieka. W artykule postanowiono odpowiedzieć na następujący problem badawczy: „Czy deficyt snu może wpłynąć na stan psychofizyczny pilota statku powietrznego oraz jego zdolności poznawcze?”. W tym celu zebrano grupę badawczą składającą się z 5 osób posiadających licencję pilota turystycznego PPL(A). W badaniach zostały zastosowane obiektywne metody oceny stanu psychofizycznego pilota takie jak praca układu sercowo-naczyniowego człowieka oraz elektroencefalografia. Loty symulowane zostały przeprowadzone przy użyciu symulatora CKAS Motion Sim 5. Do pomiaru pracy układu sercowo-naczyniowego wykorzystano pas POLAR, a do pomiaru aktywności elektrycznej mózgu urządzenie Mindwave Mobile. Na podstawie wyników pomiarów zebrano dane dotyczące zmienności rytmu serca, skupienia i relaksacji. Analiza składa się z dwóch etapów. Przeprowadzone badania wskazują na różnice w osiągniętych przez badanych parametrach częstotliwości pracy serca, skupienia oraz relaksacji przy porównaniu uzyskanych wyników do przebiegu lotu wzorcowego. Na podstawie wyników oraz dokonanej analizy można stwierdzić, że deficyt snu znacząco wpływa na analizowane parametry stanu psychofizycznego pilota.

Słowa kluczowe: symulator lotów, deficyt snu, stan psychofizyczny

* Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Napędów, Zakład Lotnictwa

1. WPROWADZENIE

Zapewnienie bezpieczeństwa podczas operacji lotniczej jest niezbędne w transporcie lotniczym. Szacuje się, że obecnie od 70% do 80% zdarzeń w lotnictwie cywilnym jest spowodowanych czynnikiem ludzkim. Wyraźnie zauważalne jest również zainteresowanie lotnictwem – w Polsce w ciągu ostatnich 4 lat wzrosła liczba wydanych licencji lotniczych. Każdego roku w przypadku licencji pilotów liniowych (ATPL), zawodowych (CPL), turystycznych (PPL) i rekreacyjnych (LAPL) liczba nowych licencji wzrastała o 10% do 2020 roku w każdej z grup. Czynniki ludzkie są najsłabszym i najbardziej nieprzewidywalnym elementem wypadków [Carver 2017, Ceakn et.al 2014, Cokorilo 2013, Kovacs et al. 2021]. Aspekt czynnika ludzkiego w przypadku operatorów tematem w wielu opracowaniach, które prowadzą badania nad ludzkim zachowaniem i reakcjami na różne sytuacje stresowe i tam gdzie to właściwe, proponują środki, które mogą wyeliminować potencjalne awarie i błędy prowadzące do wystąpienia zdarzeń niepożądanych [Galant et al. 2019]. Zapewnienie odpowiedniego poczucia bezpieczeństwa, komfortu, satysfakcji i efektywności jest możliwe, gdy operator wykonuje określone zadania przy optymalnym poziomie obciążenia [Hertzum i Holmegaard 2012]. Pilot, jak każdy człowiek, ma pewne ograniczenia. Prawdopodobieństwo popełnienia błędu jest jeszcze większe, gdy pojawiają się takie czynniki, jak nerwy, stres i zmęczenie. Szybkie przemieszczanie się przez kilka stref czasowych może dodatkowo doprowadzić do syndromu nagłej zmiany strefy czasowej (tzw. *jet lag*).. Ciągłe zaburzenie rytmu dobowego i zaburzenie dobowej orientacji organizmu mają negatywny wpływ na zdolności poznawcze człowieka. Człowiek potrzebuje odpowiedniej dawki snu do prawidłowego funkcjonowania. Liczba godzin, które ludzie powinni przesypiać w ciągu dnia, jest kwestią indywidualną, uzależnioną od wielu czynników, ale dla osoby dorosłej zalecana długość snu powinna mieścić się w przedziale od 7 do 9 godzin. Oznacza to, że około 1/3 każdego dnia spędzana jest na śnie. Deficyt snu (w stosunku do zaleceń) może nieść za sobą szereg negatywnych objawów dla organizmu człowieka. Przykładami krótkotrwałych skutków braku snu są wydłużony czas reakcji, zaburzenia uwagi i koncentracji, problemy z pamięcią (zarówno pamiętaniem, jak i przypominaniem faktów), roztargnienie, popełnianie błędów, obniżone zdolności poznawcze i logiczne, podwyższony poziom stresu, zmęczenie, senność, drażliwość, utrata motywacji i pogorszenie wyników pracy [Matos et al. 2020]. Objawy te stają się zauważalne stopniowo wraz ze zwiększeniem czasu od ostatniej sesji snu. Ich intensywność jest zróżnicowana w zależności od wielu czynników, takich jak: wykonywana aktywność (monotematyka znacząco przyczynia się do zaostrzenia objawów), stan fizyczny i emocjonalny, wpływ związków chemicznych na organizm (np. kofeina), nasilenie innych potrzeb fizjologicznych oraz wpływ hormonów takich jak adrenalina [Caldwell 2012, Caldwell 2005]. Każda osoba doświadcza danego objawu inaczej i z różnym nasileniem [Reilly i Edwards 2007]. Artykuł ma na celu odpowiedź na następujący problem badawczy: „Czy deficyt snu może wpły-

wać na stan psychofizyczny pilota samolotu?”. W kolejnych częściach zaprezentowana metodyka badawcza, oraz wyniki badań. Kolejno przeprowadzono dyskusję z wynikami prac innych naukowców. Pracę zwieńczono wnioskami

2. METODYKA BADAWCZA

W celu odpowiedzi na pytanie badawcze utworzono grupę badawczą składającą się z 5 osób posiadających licencję pilota turystycznego PPL(A). Badani znajdowali się w rzedziale wiekowym pomiędzy 22 a 25 lat. Niektóre podmioty posiadają również licencję pilota szybowcowego SPL lub przechodzą zintegrowane szkolenie ATPL(A). Wszyscy respondenci deklarowali brak przeciwwskazań do pilotowania samolotu lub wykonywania lotu symulowanego, a swoją sprawność fizyczną oceniali w sześciopunktowej skali (od 1 do 6) w zakresie 4-6. Przed rozpoczęciem badania piloci wypełnili również krótki kwestionariusz dotyczący jakości i długości ich dziennego snu oraz liczby godzin snu przed badaniem wzorcowym. W badaniu kwestionariuszowym wykazano, iż 80% ankietowanych zadeklarowało brak zaburzeń snu i większych problemów z jakością snu. Każda z osób badanych uczestniczyła w badaniu składającym się z 3 etapów: I etap to pomiar spoczynkowy, II etap to lot wzorcowy, III etap polegał na wykonaniu kręgu nadlotniskowego po całodobowej deprywacji snu. Na każdym etapie badań pilot wykonał ten sam krąg. W badaniach wykorzystano obiektywne metody oceny stanu psychofizycznego pilota, takie jak praca układu sercowo-naczyniowego człowieka i elektroencefalografia. Loty symulowane wykonano za pomocą symulatora CKAS Motion Sim 5 (rys. 1A). Do pomiaru pracy układu sercowo-naczyniowego wykorzystano pas POLAR, natomiast do uproszczonego pomiaru elektroencefalograficznego wykorzystano opaskę MindWave Mobile (rys. 1B i 1C). Na podstawie dokonanych pomiarów, do analizy, postanowiono wykorzystać parametry częstotliwości pracy serca, reprezentujące aktywność układu sercowo-naczyniowego oraz poziom koncentracji i relaksacji wyznaczone na podstawie pomiaru elektroencefalograficznego.



Rys. 1. Aparatura badawcza A) CKAS Flight Simulator, B) Mindwave Mobile, C) Pas POLAR

Zebrane wyniki częstotliwości pracy serca (z nag. *Heart Rate Variability* – HRV) analizowano za pomocą oprogramowania Kubios HRV, a wyniki pomiarów elektroencefalograficznych importowano do programu Excel MS Office. Zgodnie z zasadami krótkotrwałych pomiarów HRV do obliczeń wykorzystano 5-minutowe fragmenty. Na ich podstawie dla każdego z badanych pilotów wybrano do dalszej analizy 10 zmiennych. Analizowanymi zmiennymi [Mansikka et al. 2016, Shaffer i Ginsberg 2017] były:

- RR - średnia długość interwału RR [ms],
- HR - średnie tętno [bpm],
- HR max. - tętno maksymalne [bpm],
- HR min. - minimalne tętno [bpm],
- SDNN - odchylenie standardowe interwałów NN [ms],
- S - poziom koncentracji [%],
- R - poziom relaksacji [%],
- SD1 - parametr wyznaczony na podstawie wykresu Poincarè. Jest to odchylenie standardowe prostopadłe do linii idyncności. Wskaźnik ten charakteryzuje się tymczasową zmiennością [ms],
- SD2 - parametr wyznaczony na podstawie wykresu Poincarè. Jest to odchylenie standardowe wzdłuż linii idyncności. Wskaźnik ten charakteryzuje długoterminową zmienność rytmu serca i odzwierciedla ogólną zmienność.
- SD1/SD2 - stosunek parametrów SD1 i SD2 [ms].

Tabela 1

Pierwszy etap analizy statystycznej. Fragment wyników testów na rozkład normalny

Zmienna	Test Shapiro – Wilk	Wartość p	Istotność	Typ testu istotności
SDNN	0,755	0,033	p>0,05	parametryczny
SDNN*	0,867	0,256	p>0,05	
SDNN*	0,911	0,474	p>0,05	
HR max,	0,653	0,003	p<0,05	nieparametryczny
HR max,*	0,802	0,107	p>0,05	
HR max,*	0,807	0,092	p>0,05	
...				
SD1	0,828	0,134	p>0,05	parametryczny
SD1*	0,992	0,986	p>0,05	
SD1*	0,827	0,132	p>0,05	
SD2	0,813	0,103	p>0,05	parametryczny
SD2*	0,943	0,690	p>0,05	
SD2*	0,891	0,364	p>0,05	
Brak znacznika – pomiar w fazie spoczynkowej; *wartość zmiennej dla pomiaru referencyjnego; **wartość zmiennej dla pomiaru porównawczego				

Każda ze zmiennych została odpowiednio obliczona dla poszczególnych osób na każdym etapie badania, tj. podczas fazy spoczynkowej, lotu referencyjnego i lotu porównawczego (po 24-godzinny deficycie snu). Do analizy istotności uzyskanych wyników wykorzystano program STATISTICA. Pierwszym etapem było sprawdzenie normalności rozkładów zmiennych testem Shapiro-Wilka na poziomie istotności $p > 0,05$. Tylko zmienna HR max. nie charakteryzowała się rozkładem normalnym (tab. 1). Następnym krokiem było wykonanie testów istotności dla sparowanych próbek, tj. parametrycznego testu t-Studenta dla zmiennych o rozkładzie normalnym oraz nieparametrycznego testu par Wilcoxon'a dla zmiennej, która nie miała rozkładu normalnego. W każdym przypadku porównania dokonywano parami. Przykład porównania pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat porównania zmiennych

Zakładając poziom istotności $p < 0,05$, do dalszej analizy wybrano zmienne: SDNN, SD1, SD2 i S. Są to zmienne, których wartość p była mniejsza niż 0,05 (tabela 2).

Tabela 2

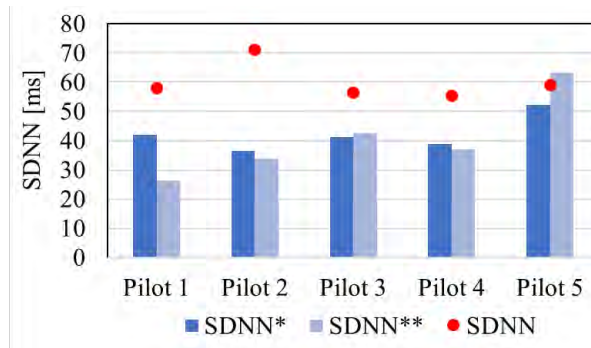
Drugi etap analizy statystycznej. Istotność statystyczna dla każdej porównanej pary zmiennych

Zmienna	Test T-student's	Test Wilcoxon'a	Wartość p	Istotność
\bar{x} RR and \bar{x} RR*	1,081		0,340	$p > 0,05$
\bar{x} RR and \bar{x} RR**	0,495		0,647	$p > 0,05$
\bar{x} RR* and \bar{x} RR**	0,094		0,930	$p > 0,05$
\bar{x} HR and \bar{x} HR*	0,944	0,345		$p > 0,05$
\bar{x} HR and \bar{x} HR**	0,135	0,893		$p > 0,05$
\bar{x} HR* and \bar{x} HR**	0,405	0,686		$p > 0,05$
SDNN and SDNN*	2,669		0,049	$p < 0,05$
SDNN and SDNN**	3,932		0,017	$p < 0,05$
SDNN* and SDNN**	0,356		0,740	$p > 0,05$
HR max and HR max*	2,086		0,128	$p > 0,05$

HR max and HR max **	1,183		0,302	p>0,05
HR max* and HR max **	1,972		0,143	p>0,05
HR min and HR min*	1,891		0,132	p>0,05
HR min and HR min **	1,591		0,187	p>0,05
HR min* and HR min **	0,956		0,393	p>0,05
SD1 and SD1*	1,209		0,043	p<0,05
SD1 and SD1**	2,193		0,043	p<0,05
SD1* and SD1**	1,276		0,027	p<0,05
SD2 and SD2*	4,144		0,014	p<0,05
SD2 and SD2**	2,507		0,046	p<0,05
SD2* and SD2**	0,080		0,940	p>0,05
SD1/SD2 and SD1/SD2*	2,764		0,040	p>0,05
SD1/SD2 and SD1/SD2**	2,137		0,049	p>0,05
SD1/SD2* and SD1/SD2**	0,607		0,577	p>0,05
S and S*	1,590		0,018	p<0,05
S and S**	0,826		0,046	p<0,05
S* and S**	0,817		0,046	p<0,05
R and R*	0,084		0,937	p>0,05
R and R**	0,033		0,975	p>0,05
R* and R**	0,219		0,837	p>0,05

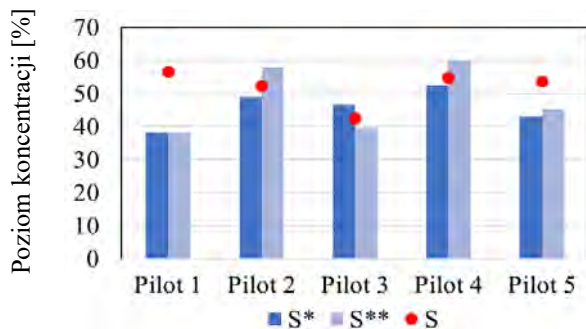
3. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie wartości wyznaczonych zmiennych, opracowano wykresy przedstawiające wyniki uzyskane w grupie badawczej. Na rysunkach 3-6 zaprezentowano wartości zmiennych SDNN, S oraz SD1 i SD2. Na każdym z rysunków wartości zmiennych dla pomiaru spoczynkowego zaznaczono kolorem czerwonym, ciemnoniebieskim oznaczono, wartości uzyskane podczas lotu wzorcowego, natomiast kolorem jasnoniebieskim wartości zmiennych dla pomiarów wykonanych po 24-godzinnym deficycie snu. Na rysunku 3 przedstawiono wartości odchylenia standardowego interwałów NN, a na rysunku 4 poziom koncentracji.



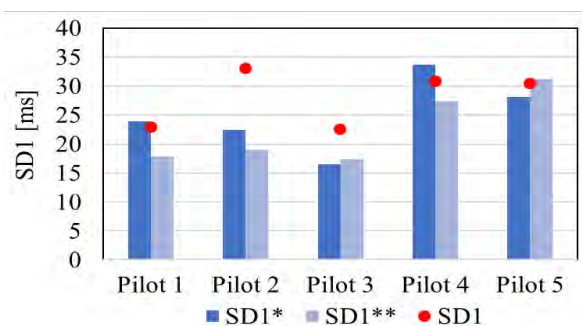
Rys. 3. Parametr SDNN dla każdego pilota

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki dla zmiennej SDNN, czyli odchylenia standardowego interwałów NN. Interwały normalne NN to interwały RR wyrażone milisekundach po usunięciu wszystkich artefaktów z danych. Mniejsze odchylenia interwałów NN podczas lotów wskazują na mniejszą zmienność częstotliwości pracy serca. Świadczy to o większym obciążeniu zadaniami podczas wykonywania danej operacji lotniczej. Zwłaszcza po 24-godzinnym deficycie snu.



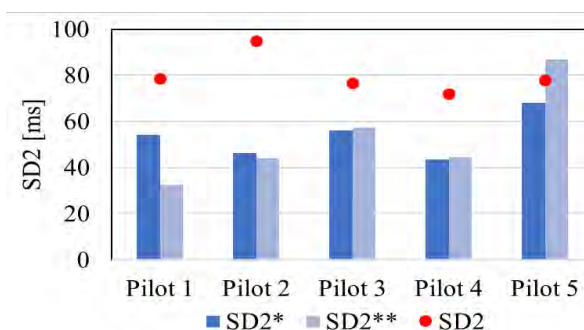
Rys. 4. Parametr poziom koncentracji dla każdego pilota

Na rysunku 4 przedstawiono poziom skupienia każdego z pilotów. W przypadku pilotów 2 i 4 poziom skupienia był wyższy po deficycie snu niż podczas lotów wzorcowych i podczas pomiaru spoczynkowego. Natomiast piloci 1 i 3 osiągnęli poziom koncentracji równy lub niższy niż po 24-godzinnym deficycie snu, niż podczas pomiaru spoczynkowego i wzorcowego.



Rys. 5. Parametr SD1 dla każdego pilota

Parametr SD1 charakteryzuje chwilową zmienność rytmu serca (rys. 5), natomiast parametr SD2 to długoterminową zmienność rytmu serca (rys. 6). Analizując wykresy można zauważyć, że w przypadku parametru SD1 chwilowa zmienność tętna była mniejsza po znacznym deficycie snu, w porównaniu z pomiarem spoczynkowym i lotem referencyjnym dla pilotów 2 i 3 oraz w porównaniu do pomiaru spoczynkowym dla wszystkich pilotów.



Rys. 6. Parametr SD2 dla każdego pilota

Porównując wykonane loty porównawcze z pomiarem spoczynkowym, parametr SD2 osiągnął niższe wartości dla każdego z badanych pilotów. W przypadku pilota 5 wartość zmiennej SD2 po deficycie snu, była znacznie większa, niż wynik uzyskany w locie referencyjnym i podczas odpoczynku. Duży wpływ deficytu snu widoczny jest również w wynikach pilota nr 1. Wartość parametru SD2 po deficycie snu była znacznie niższa niż uzyskana podczas lotu wzorcowego. Wskazuje to na większe obciążenie zadaniami podczas lotu po deficycie snu.

4. Dyskusja

Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że praca układu sercowo-naczyniowego odzwierciedla stan zdrowia fizycznego i zdolność organizmu do radzenia sobie w sytuacjach stresowych. Badania naukowe potwierdzają również, że zmienność rytmu serca jest parametrem najlepiej oceniającym stan psychofizyczny człowieka. Ze względu na bezpośredni związek między układem współczulnym i przywspółczulnym u ludzi [Alba et al. 2019, Luo et al. 2019, Malik et al. 2017, Mather i Thayer 2018, Xiu et al. 2016]. Na podstawie analizy literaturowej badań można przypuszczać, że zwiększenie obciążenia zadaniowego powoduje zmniejszenie wartości parametrów HRV [Chand et al. 2020, Matos et al. 2020, Siennicka et al. 2019]. Dotychczasowe badania potwierdzają, że parametry HRV będą się zmniejszały wraz ze wzrostem obciążenia pracą. Analiza literatury oraz przeprowadzone badania potwierdzają również, że praca układu sercowo-naczyniowego może być wykorzystywana do oceny stanu psychofizycznego pilotów. Zmęczenie wynikające z braku snu towarzyszy pilotom od zawsze i jest przedmiotem badań m.in. NASA (ang. *National Aeronautics and Space Administration*, Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej) i ARC (Centrum Badawcze imienia Josepha Ames, ang. *Ames Research Center*) od ponad 20 lat. W jednym z badań stwierdzono występowanie zmęczenia wynikającego z deficytu snu podczas operacji lotniczej [Wingelaar et al. 2021]. Obecnie problem zaburzeń snu i rytmów dobowych jest jeszcze istotniejszy, ponieważ operacje przewoźników lotniczych wykonywane są 24 godziny na dobę, 7 dni w tygodniu. Jedno z badań NASA dotyczące pilotów komercyjnych linii lotniczych miało na celu sprawdzenie całkowitego czasu snu i skumulowanego deficytu snu podczas lotów biznesowych. Wykazano, dla badania pilotów krótkodystansowych, że spali średnio 6,7 godziny podczas 12,5-godzinnej przerwy między lotami planowymi. W obserwacji operacji dalekodystansowych zauważono, że piloci spali tylko 5,3 godziny podczas normalnego okresu snu, które uzupełniali drzemkami, aby zapewnić 6,5 godziny snu dziennie. Podczas normalnej eksploatacji piloci spali przed odlotem odpowiednio 7,1 godziny i 7,3 godziny na dobę. Nocni piloci cargo spali średnio 4,6 godziny w głównym okresie snu i 6,3 godziny całkowitego snu na noc, w porównaniu z 7,5 godzinami, które spali przed odlotem [Wingelaar et al. 2021]. Reasumując przedstawione badania, różnych rodzajów lotów pomiędzy różnymi liniami lotniczymi, wykazano, że około 85% ankietowanych pilotów doświadczyło deficytu snu podczas wyjazdów służbowych. W sumie deficyt ten wahał się od kilku godzin w przypadku lotów krótkodystansowych do nawet kilkudniowego całkowitego pozbawienia snu dla pilotów długodystansowych.

Niezależne badania zmęczenia wśród pilotów. że około 68-91% pilotów linii lotniczych zgłaszało problemy z wyczerpaniem. Instytucje bezpieczeństwa lotniczego. takie jak Narodowa Rada Bezpieczeństwa Transportu (ang. *National Transportation Safety Board*, NTSB) podkreślają znaczenie zmęczenia pilotów w wypadkach lotniczych od lat 60. XX wieku. Od 1972 r. NTSB wydała ponad 200 zaleceń dotyczących bezpieczeństwa dla zmęczenia pilotów, które od 1990 roku znajdują się na liście *NTSB Most Wanted List* w zakresie bezpieczeństwa lotów.

5. WNIOSKI

Analizując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że istnieją znaczne różnice między pomiarem podczas spoczynku a wykonywanymi lotami, zarówno w odniesieniu do lotu wzorcowego jaki i porównawczego. Zmienna SDNN odzwierciedla spontaniczne zmiany rytmu zatokowego pod wpływem współczulnego układu nerwowego i aktywację układu przywspółczulnego. Niższe wartości SDNN mogą wskazywać na zwiększoną aktywność współczulnego układu nerwowego, co może zatem wskazywać na stres [Kim et al. 2008]. Znacznie niższe wartości parametru SD1, niż parametr SD2 mogą wskazywać na mniej dynamiczne zmiany w współczulnym układzie nerwowym. Niektórzy z badanych (Pilot 1, 3 i 5) osiągnęli niższy poziom koncentracji po 24-godzinny deficycie snu niż podczas pomiaru spoczynkowego i lotu wzorcowego. Może to wskazywać na problem z koncentracją, spowodowany brakiem snu. Na podstawie wykonanych pomiarów i analiz można jednoznacznie stwierdzić, że deficyt snu wpływa na parametry psychofizyczne pilota. Uzyskane wartości wskazują na stres podczas lotów porównawczych u pilotów 1, 2 i 4. Oznacza to, że deficyt snu niekorzystnie wpływa na ciało pilota i może wpływać na bezpieczeństwo operacji lotniczych.

LITERATURA

1. Alba. G., Jaime V., Rey. Beatriz; Montoya P., Munoz A.. M., (2019), The Relationship Between Heart Rate Variability and Electroencephalography Functional Connectivity Variability Is Associated With Cognitive Flexibility. doi.org/10.3389/FNHUM.2019.00064. Published in *Frontiers in Human Neuroscience*.
2. Caldwell, J. A., (2012), Crew Schedules, Sleep Deprivation, and Aviation Performance. *Current Directions in Psychological Science*, 21(2), 85–89, doi:10.1177/0963721411435842
3. Caldwell, J. A., (2005), Sleep and Aviation. *Sleep: A Comprehensive Handbook*, 939–945, 2005, doi:10.1002/0471751723.ch123
4. Carver J.C., (2017) Penzenstadler B.. Serebrenik A.. Yamashita A.: The Human Factor. *IEEE SOFTWARE*. vol. 34. iss. 5. DOI: 10.1109/MS.2017.3571580. 4.

5. Cekan P., Korba P., Sabo J., (2014), Human Factor in Aviation - Models Eliminating Errors. Transport Means - Proceedings of the International Conference. 18th International Conference on Transport Means. Kaunas Univ. Technol. Kaunas. Lithuania.
6. Chand T., Li M., Jamalabadi H., Wagner G.; Lord A., Alizadeh S., Danyeli. L., Herrmann L., Walter M., Sen., (2020), Zumurut D. Heart Rate Variability as an Index of Differential Brain Dynamics at Rest and After Acute Stress Induction. *Frontiers in Neuroscience* . doi.org/10.3389/FNINS.2020.00645.
7. Cokorilo O., (2013), Human factor modelling for fast-time simulations in aviation. *Aircraft Engineering And Aerospace Technology*. vol. 85. iss. 5. 2013. DOI: 10.1108/AEAT-07-2012-0120.
8. Galant M., Nowak M., Kardach M., Maciejewska M., Łęgowik A., (2019), Using the simulation technique to improve efficiency in general aviation. *AIP Conference Proceedings 2078*. 020097 <https://doi.org/10.1063/1.5092100>.
9. Hertzum M., Holmegaard K., (2012). Perceived Time as a Measure of Mental Workload: Effects of Time Constraints and Task Success. *International Journal of Human-computer Interaction – IJHCI*.
10. Kim. D.; Seo. Y.; Salahuddin. L., (2008), Decreased long term variations of heart rate variability in subjects with higher self reporting stress scores. In *Proceedings of the IEEE 2008 Second International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*. Tampere.
11. Kovacs G., Hőgye-Nagy A., Kurucz G., (2021). Human Factor Aspects of Situation Awareness in Autonomous Cars – An Overview of Psychological Approaches. *Acta Polytechnica Hungarica Acta Polytechnica Hungarica Vol. 18. No. 7*. DOI: 10.12700/APH.18.7.2021.7.1
12. Luo H., Wei J., Yasin Y., Wu S.J., Barszczyk A., Feng Z.-P., Lee K., (2019) Stress Determined through Heart Rate Variability Predicts Immune Function 2019. Vol.26. No. 4. October 2019. *Neuroimmunomodulation*;26:167–173 <https://doi.org/10.1159/000500863>
13. Malik M., Huikuri H., Lombardi F., Schmidt G., (2017), The purpose of heart rate variability measurements. *Clinical Autonomic Research* ., doi.org/10.1007/S10286-017-0416-8.
14. Mansikka H., Virtanen K., Harris D., Simola P., (2016). Fighter pilots' heart rate. heart rate variation and performance during an instrument flight rules proficiency test. *Applied ergonomics*. Volume 56. p. 213-219. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.04.006>
15. Mather M., Thayer J. F., (2018), How heart rate variability affects emotion regulation brain networks. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, doi.org/10.1016/J.COBEHA.2017.12.017.
16. Matos. F., Vido A., Garcia. W. F., Lopes. W. A., Pereira A., (2020) A Neurovisceral Integrative Study on Cognition. Heart Rate Variability. and Fitness in the Elderly. *Frontiers in Aging Neuroscience*. doi.org/10.3389/FNAGI.2020.00051.
17. Orzeł-Gryglewska J., (2010), Consequences of sleep deprivation. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*;23 (1):95–114.
18. Reilly T., Edwards B., (2007), Altered sleep-wake cycles and physical performance in athletes. *Physiol. Behav.*; 90: 274-284.

19. Shaffer F., and Ginsberg J. P., (2017) An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in Public Health*. doi: 10.3389/fpubh.2017.00258. URL <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>.
20. Siennicka. A.; Quintana. D. S.; Fedurek. P.; Wijata. A.; Paleczny. B.; (2019), Ponikowska. B.; Danel. D. P. Resting heart rate variability. attention and attention maintenance in young adults. Published in *International Journal of Psychophysiology*.
21. Wingelaar-Jagt Y.Q., Wingelaar T.T., Riedel W.J., Ramaekers J.G., (2021), *Fatigue in Aviation: Safety Risks. Preventive Strategies and Pharmacological Interventions*.
22. Xiu LC., Zhou RL., Jiang YH., (2016) Working memory training improves emotion regulation ability: Evidence from HRV. *Physiology & Behavior* Volume 155. Pages 25-29. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.12.004>

THE IMPACT OF SLEEP DEFICIT ON PILOTS' PSYCHOPHYSICAL STATE DURING SIMULATED FLIGHT

Abstract

Ensuring safety during an air operation is essential for air transport. It is estimated that nowadays between 70% and 80% of civil aviation incidents are caused by the human factor. The pilot in command is the decision-maker and person responsible for safety on board the aircraft. The constant disturbance of the circadian rhythm and disturbance of the circadian orientation of the organism have a negative impact on the cognitive abilities of a person. In the article it was decided to analyze the influence of the sleep deficit on the psychophysical state of the aircraft pilot. The article answers to the following research problem: "Can a sleep deficit affect the psychophysical state of an aircraft pilot and his cognitive abilities?". For this purpose, a research group was assembled, consisting of 5 people with the private pilot license PPL(A). The research used objective methods of assessing the psychophysical state of the pilot, such as the work of the human cardiovascular system and electroencephalography. Simulated flights were performed using the CKAS Motion Sim 5 simulator. For cardiovascular work measurement Polar belt was used and for electroencephalography measurement device Mindwave Mobile. Based on the measurement results, data on heart rate variability, focus and relaxation were collected. Analysis consist of two stages. First prepared statistical analysis and based on this proper characteristics was made. The conducted research shows differences in the achieved by the tested parameters of the heart rate, focus and relaxation when comparing the obtained results to the course of the reference flight. Based on the results and the analysis performed, it can be concluded that the sleep deficit significantly influences the analyzed parameters of the tested pilot's psychophysical state.

Key words: flight symulator, psychophysical state, sleep deficit

Tadeusz MIKUTEL*

POZAHORYZONTALNE SYSTEMY RADIOLOKACYJNE WCZESNEGO OSTRZEGANIA W OCHRONIE INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ

Prezentowane opracowanie dotyczy ochrony infrastruktury krytycznej. Kluczową rolę w tym zakresie odgrywają systemy wczesnego ostrzegania pozwalające na wykrywanie oraz identyfikację zagrożeń jak również wsparcie systemu reagowania kryzysowego. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące wykorzystania pozahoryzontalnych systemów radiolokacyjnych wspierających działania służb odpowiedzialnych za zapewnienie bezpieczeństwa krytycznych elementów infrastruktury oraz ochronę szeroko rozumianych interesów państwa.

Słowa kluczowe: infrastruktura krytyczna, radar pozahoryzontalny, wczesne ostrzeganie.

1. WPROWADZENIE

Ochrona infrastruktury krytycznej, jako zasobu kluczowego dla realizacji zadań państwa, a niekiedy nawet dla jego fizycznego przetrwania jest jednym z podstawowych zadań zarówno wyspecjalizowanych organizacji (Sił Zbrojnych, służb porządku publicznego) jak i operatorów, w których władaniu takowa infrastruktura się znajduje [Mikutel T., 2016]. Przedsięwzięcia związane z ochroną infrastruktury krytycznej mogą być zaszeregowane do trzech zasadniczych obszarów mających kluczowe znaczenie dla skuteczności funkcjonowania całego systemu:

- Wykrywanie, identyfikacja, zapobieganie, przeciwdziałanie oraz przygotowanie do reagowania na zagrożenia dla infrastruktury krytycznej;
- Zmniejszanie podatności krytycznych elementów, systemów i sieci;
- Minimalizowanie konsekwencji wypadków, zdarzeń i innych wrogich działań w stosunku do infrastruktury krytycznej.

Zasadniczym problemem związanym z bezpieczeństwem infrastruktury krytycznej jest zapewnienie odpowiedniej jakości informacji o potencjalnych zagrożeniach (rodzaju, położeniu, możliwym sposobie oddziaływania) oraz zapewnienie czasu niezbędnego na podjęcie skutecznej reakcji na ewentualne zakłócenia. Obydwa zadania mogą być efektywnie realizowane poprzez zapewnienie odpowiednich

* Sztab Generalny Wojska Polskiego.

środków technicznych zdolnych do odpowiednio wczesnego wykrycia zagrożenia, analizy danych oraz ułatwiających realizację procesu decyzyjnego co do sposobu reagowania przez system obrony/ochrony krytycznych elementów infrastruktury państwa [Mikutel T., 2020]. Jednym z rozwiązań pozwalających na wypełnienie takich zadań jest wykorzystanie systemów radiolokacyjnych dalekiego zasięgu zdolnych do wykrywania zagrożeń w odległości setek a nawet tysięcy kilometrów, niezależnie od pogody oraz sposobu ich przemieszczania w kierunku ochranianego obiektu (na lądzie, morzu lub w powietrzu).

2. DEFINICJE

Infrastruktura krytyczna – systemy oraz wchodzące w ich skład powiązane ze sobą funkcjonalnie obiekty, w tym obiekty budowlane, urządzenia, instalacje, usługi kluczowe dla bezpieczeństwa państwa i jego obywateli oraz służące zapewnieniu sprawnego funkcjonowania organów administracji publicznej, a także instytucji i przedsiębiorców. Infrastruktura krytyczna obejmuje systemy [Ustawa... 26 kwietnia 2007]:

- a) zaopatrzenia w energię, surowce energetyczne i paliwa,
- b) łączności,
- c) sieci teleinformatycznych,
- d) finansowe,
- e) zaopatrzenia w żywność,
- f) zaopatrzenia w wodę,
- g) ochrony zdrowia,
- h) transportowe,
- i) ratownicze,
- j) zapewniające ciągłość działania administracji publicznej,
- k) produkcji, składowania, przechowywania i stosowania substancji chemicznych i promieniotwórczych, w tym rurociągi substancji niebezpiecznych

Ochrona infrastruktury krytycznej – zgodnie z art. 3 pkt 3 ustawy o zarządzaniu kryzysowym – należy przez to rozumieć wszelkie działania zmierzające do zapewnienia funkcjonalności, ciągłości działań i integralności infrastruktury krytycznej w celu zapobiegania zagrożeniom, ryzykom lub słabym punktom oraz ograniczenia i neutralizacji ich skutków oraz szybkiego odtworzenia tej infrastruktury na wypadek awarii, ataków oraz innych zdarzeń zakłócających jej prawidłowe funkcjonowanie;

System wczesnego ostrzegania (SWO) - system stworzony do informowania o niepożądanych zdarzeniach np. katastrofach naturalnych w czasie na tyle wczesnym, aby była możliwość działania zapobiegającego lub zmniejszającego straty, np. ewakuacji ludzi i ich dobytku.

3. SYSTEM WCZESNEGO OSTRZEGANIA

Wczesne ostrzeganie jest jednym z najważniejszych elementów służących zmniejszeniu ryzyka (zagrożenia) dla infrastruktury krytycznej. Dotyczy ono całego spektrum pojawiających się zagrożeń, zarówno naturalnych, jak i powstałych na skutek celowej działalności człowieka. Zagrożenia naturalne, spowodowane czynnikami niezależnymi od człowieka to między innymi huragany i trąby powietrzne, susze, powodzie, trzęsienia ziemi i spowodowane nimi fale tsunami, intensywne opady śniegu i lawiny śnieżne, rozległe pożary a także katastrofy wywołane przez czynniki kosmiczne. Zagrożenia wywołane działaniem człowieka dzielone są zwykle na zagrożenia militarne (wywołane poprzez działania sił zbrojnych jako organu państwa), niemilitarne (ekonomiczne, społeczne, ekologiczne) oraz terrorystyczne. [Rübbelke D., Vögele S., 2010].

Właściwie zaprojektowany, skonstruowany i funkcjonujący system wczesnego ostrzegania (SWO) pozwala na znaczące ograniczenie strat materialnych i osobowych w rejonach (obiektach) o kluczowym znaczeniu dla funkcjonowania państwa. SWO tworzą cztery elementy:

- Wiedza dotycząca potencjalnego zagrożenia dla elementów infrastruktury krytycznej, ale również wrażliwości (podatności) chronionego obiektu na różne typy zagrożeń (świadomość ryzyka);
- Monitoring i ostrzeganie o występujących zagrożeniach w tym zapewnienie właściwej świadomości społecznej co do funkcjonowania SWO;
- Systemy komunikacji oraz rozpowszechniania informacji o zagrożeniach;
- Środki (zdolności) do reagowania na zagrożenia.

Warunkiem skutecznego działania takiego systemu jest efektywne współdziałanie wszystkich wymienionych elementów. Utrzymywanie w odpowiedniej gotowości SWO zapewnia możliwości szybkiego wykrycia zagrożenia (z wyprzedzeniem pozwalającym na stosowną reakcję), dystrybucję czytelnych (jasnych co do formy zagrożenia, skali oraz obszaru jego występowania) sygnałów ostrzegania i umożliwia terminową mobilizację sił pozwalających np. na ewakuację ludności, zabezpieczenie budynków czy zgromadzenie odpowiednich zapasów energii, żywności i leków [Federal Foreign Office... 2006] [United Nations... 2006].

Jak wynika z powyższych założeń czynnikiem determinującym skuteczność działania systemu jest przede wszystkim zdolność do szybkiego wykrycia oraz identyfikacji zagrożenia i nie ma wielkiego znaczenia, czy jest to czynnik naturalny, czy też wywołany przez człowieka. Niewątpliwie jednak zasadnicze znaczenie dla funkcjonowania systemu wykrywania i ostrzegania ma rodzaj środków, które takowy system wykorzystuje, szczególnie pod względem niezawodności oraz dokładności ich działania.

Systemy wykrywania i ostrzegania stosowane obecnie wykorzystują różnorodne metody przeszukiwania przestrzeni wokół ochranianego obiektu, jak również oceny

pojawiającego się zagrożenia. W znaczącej części są to systemy wykorzystujące sygnały akustyczne, sejsmiczne, optyczne (w zakresie światła widzialnego lub w podczerwieni) oraz impulsy (promieniowanie) elektromagnetyczne. Systemy optyczne, akustyczne czy sejsmiczne jako systemy bierne, posiadają stosunkowo niewielki zasięg uzależniony od warunków atmosferycznych, wilgotności, temperatury otoczenia oraz rodzaju ośrodka, w którym rozchodzą się sygnały, a które powodują tłumienie sygnału odbieranego przez detektory systemu. Z tego powodu instalacje wykorzystujące takie systemy, ze względu na konieczność zaangażowania znacznej liczby czujników, wykorzystywane są do ochrony stosunkowo niewielkich obiektów. W stosunku do obiektów o dużych rozmiarach (nawet setek i tysięcy kilometrów kwadratowych) najbardziej skutecznym rozwiązaniem jest zastosowanie systemów radiolokacyjnych.

4. RADIOLOKACJA POZAHORYZONTALNA

Systemy radiolokacyjne obserwacji przestrzeni powietrznej i morskiej zyskały powszechne zastosowanie w okresie drugiej wojny światowej. Początkowo były to urządzenia stosunkowo mało dokładne (jak na przykład brytyjski system Chain Home o zasięgu 250km określał współrzędne obiektów z dokładnością około 1 kilometra w odległości i 12 stopni w azymucie) ale z biegiem czasu zyskały na dokładności, co było szczególnie widoczne w przypadku radarów, którymi dysponowała III Rzesza. Niemiecki radar typu FuMG.42 „Wassermann S” o zasięgu 300km był w stanie określić położenie celu z dokładnością 300m w odległości i 0,25 stopnia w azymucie.

Obecnie stosowane systemy radiolokacyjne mogą pracować w szerokim spektrum promieniowania radiowego (Tabela 1) i być rozmieszczane na powierzchni lądu i morza (na okrętach lub platformach) w powietrzu a nawet w przestrzeni kosmicznej. Należy jednak zauważyć, że każdy z takich systemów obarczony jest wadami związanymi z rozmiarami anten (satelity i samoloty) zakresem wykorzystywanych fal radiowych (co wpływa na zasięg wykrywania oraz dokładność określania parametrów wykrytego obiektu) oraz częstotliwością obserwacji danego elementu przestrzeni (w przypadku satelitów jest to tzw. Revisit Time)¹. Zaletą systemów radiolokacyjnych jest jednak niezależność (lub niewielka zależność szczególnie w zakresie pasma K) od warunków atmosferycznych (zachmurzenie, słaba widzialność czy opady atmosferyczne) oraz w zależności od wykorzystywanej częstotliwości pracy, wysoka dokładność wykrywania obiektów.

¹ Nie dotyczy to oczywiście satelitów geostacjonarnych, które utrzymują ustaloną pozycję nad wskazanym obiektem.

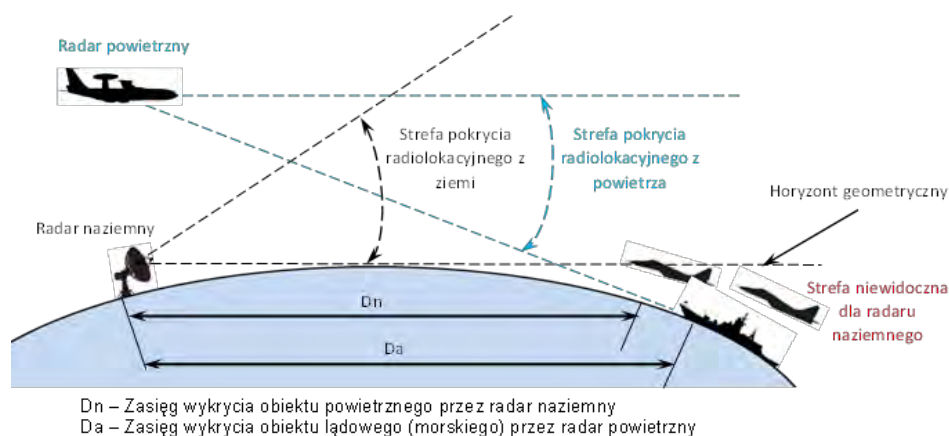
Tabela 1

Pasma promieniowania elektromagnetycznego oraz potencjalne zastosowania systemów radiolokacyjnych w zależności od częstotliwości pracy (długości fali) [Fabrizio G. A., 2013].

Oznaczenie Pasma	Częstotliwość	Długość fali	Przykładowe zastosowania
HF	3-30MHz	100-10m	Obserwacja pozahoryzontalna w tym wykrywanie obiektów powietrznych i lądowych (morskich)
VHF	30-300MHz	10-1m	Wykrywanie obiektów powietrznych na bardzo dużych odległościach
UHF	300-1000MHz	1-0,3m	Wykrywanie obiektów powietrznych na bardzo dużych odległościach w tym przez systemy umieszczone na samolotach wczesnego ostrzegania oraz systemy obrony przeciwrakietowej
L	1-2GHz	30-15cm	Wykrywanie obiektów powietrznych na bardzo dużych odległościach w tym przez systemy umieszczone na samolotach wczesnego ostrzegania
S	2-4GHz	15-7,5cm	Radary wielofunkcyjne w tym kontroli ruchu lotniczego, radary morskie
C	4-8GHz	7,5-3,75cm	Radary kierowania uzbrojeniem krótkiego i średniego zasięgu, radary pogodowe
X	8-12GHz	3,75-2,5cm	Powietrzne (samolotowe) radary przechwytyjące, systemy naprowadzania rakiet
Ku	12-18GHz	2,5-1,67cm	Radiolokacyjne systemy wykrywania krótkiego zasięgu, radary morskie
K	18-27GHz	1,67-1,11cm	Pasmo o ograniczonym zastosowaniu radiolokacyjnym ze względu na znaczne tłumienie przez cząsteczki wody (deszcz, mgła)
Ka	27-40GHz	1,11-0,75cm	Radiolokacyjne systemy wykrywania bardzo krótkiego zasięgu, radary kierowania ruchem na lotnisku.

Nie wszystkie systemy radiolokacyjne, ze względu na wykorzystywane częstotliwości pracy i związane z tym charakterystyki promieniowania (szczególnie dotyczy to zasięgu) mogą stanowić podstawę do konstrukcji skutecznego systemu wykrywania i wczesnego ostrzegania. Znacząca większość takich systemów funkcjonujących obecnie wykorzystuje pasma UHF (systemy naziemne) oraz L (systemy

powietrzne). Ponieważ radary pracujące na tych częstotliwościach zdolne są do wykrywania obiektów zakresach tzw. widzialności bezpośredniej (ang. LOS – Line of Sight) głównym ograniczeniem ich zdolności operacyjnych okazuje się jednak wpływ przeszkód terenowych (naturalnego ukształtowania terenu bądź przeszkód sztucznych) oraz krzywizny ziemi (Rysunek 1). Przejściowym rozwiązaniem było zwiększanie wysokości anten², jednak dopiero wprowadzenie wspomnianych wcześniej powietrznych systemów radiolokacyjnych przyniosło poprawę sytuacji. Ograniczenia czasowe lotu samolotów wczesnego ostrzegania (posiadanego zapasu paliwa, okresów międzyobsługowych czy wreszcie konieczności wymiany załóg) zmusiły do poszukiwań innego rozwiązania pozwalającego na obserwację obiektów ukrytych poza krzywizną ziemi, zapewniającego możliwość ciągłej obserwacji przestrzeni przez 24 godziny na dobę przez 7 dni w tygodniu.



Rys. 1. Zasięgi wykrywania dla naziemnych i powietrznych systemów radiolokacyjnych – Rysunek autora na podstawie [Fabrizio G. A., 2013].

Rozwiązaniem stały się stacje radiolokacyjne bazowania lądowego³ pracujące w zakresie częstotliwości pozwalającym na zwiększenie zasięgu wykrywania bez względu na istniejące przeszkody terenowe oraz krzywiznę ziemi. Zainteresowanie konstruktorów skierowało się w stronę fal krótkich (HF), które posiadają unikatowe zdolności do propagacji na bardzo duże odległości oraz odbicia od zewnętrznych

² Przy założeniu, że wysokość celu lotu wynosi 200 metrów, a wysokość anteny radaru 30 metrów, zasięg wykrycia wynosi około 70 kilometrów.

³ Nie ulega wątpliwości, że skutecznym środkiem wykrywania i ostrzegania radiolokacyjnego mogą być również systemy satelitarne, najczęściej wykorzystujące radary SAR (Synthetic Aperture Radar), jednak ze względu na okres rewizyty nad określonym obszarem globu oraz szerokość pasa obserwacji radarowej ich skuteczność w zakresie ciągłej obserwacji danego elementu przestrzeni jest dość ograniczona.

warstw atmosfery Ziemi (jonosfery). Dzięki takim charakterystykom fale krótkie pozwalają na obserwację obiektów zarówno w zakresie widzialności bezpośredniej (LOS), jak również poza nią (BLOS – Beyond-the-Line-of-Sight) wykorzystując dwa zakresy propagacji fal [Bem D. J., 1973] (Rysunek 2):

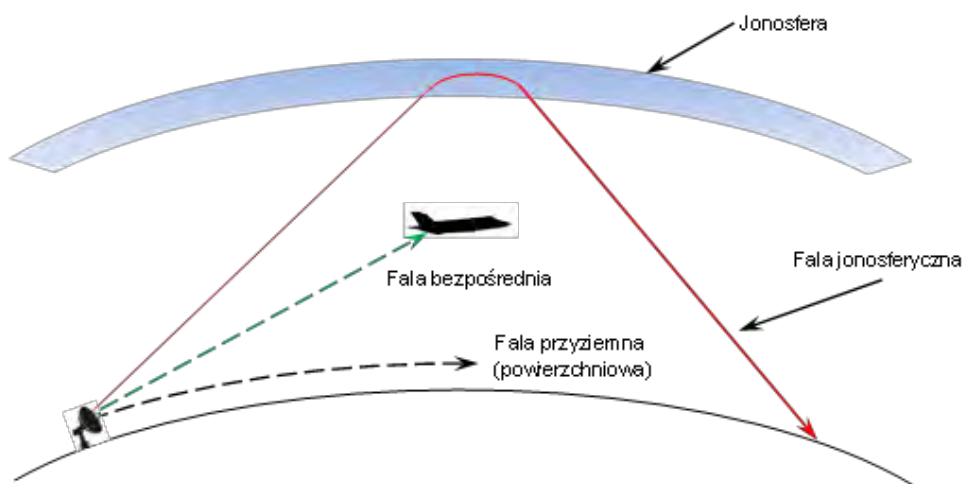
1. Falę odbitą od jonosfery, zwaną również falą jonosferyczną (ang. sky-wave) czyli taką, która dociera do odbiornika dzięki istnieniu jonosfery. Fala jonosferyczna wykorzystuje zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia fali radiowej od granicy między dwoma ośrodkami. W tym przypadku jest to granica między warstwami atmosfery ziemi, z których jedna jest elektrycznie obojętna, a druga (jonosfera)⁴ zawiera duże ilości plazmy, co powoduje załamywanie, odbijanie, polaryzację oraz pochłanianie fal radiowych. W zależności od częstotliwości pracy radaru oraz wysokości konkretnej warstwy jonosfery, od której odbija się fala radiolokacyjna, zasięg wykrywania takiego radaru może wynosić od 1800km (przy odbiciu od jonosfery na wysokości około 100km) do 3200km (przy odbiciu na wysokości około 300km). Maksymalny zasięg wykrywania może być zwiększony poprzez zastosowanie nadajników radiolokacyjnych o większej mocy i wykorzystanie wielokrotnych odbić fali radiowej od jonosfery i następnie od powierzchni terenu. W tym przypadku zasięg będzie wielokrotnością zasięgu podstawowego oraz liczby odbić fali radiowej⁵.
2. Falę przyziemną (ang. ground-wave) rozchodzącą się w pobliżu powierzchni ziemi (na granicy powietrze-ziemia). Fala przyziemna rozchodzi się częściowo w ziemi i jej zasięg zależy przede wszystkim od częstotliwości pracy (jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości – fale o mniejszej częstotliwości pozwalają osiągnąć większy zasięg) oraz mocy nadajnika a w mniejszym stopniu także od rodzaju gleby, jej wilgotności oraz temperatury [Bureau of Meteorology... 2021]. Z tego powodu zasięg fali przyziemnej jest większy nad obszarem morskim niż lądowym i jednocześnie większy

⁴ Dolna granica jonosfery znajduje się na wysokościach 50-60km nad powierzchnią ziemi, natomiast górna jej granica może przebiegać na wysokościach od 300 do niemal tysiąca kilometrów. Stan jonosfery (w tym jej dolna i górna granica oraz charakterystyka elektryczna, czyli liczba elektronów w jednostce objętości) zmienia się w zależności od pory doby. W dzień jonosfera rozciąga się na mniejszych wysokościach i ze względu na różnice w jonizacji atomów różnych gazów wchodzących w skład atmosfery ulega podziałowi na cztery wyraźne warstwy, a w jednej z nich możliwe jest nawet całkowite tłumienie fal radiowych zakresu HF. W nocy, na skutek oddziaływania promieniowania słonecznego jonosfera jest mniej zróżnicowana i składa się z dwóch warstw o niewielkiej zdolności do tłumienia fal radiowych, dzięki czemu propagacja fal krótkich jest wtedy najlepsza.

⁵ Zasięg przy jednym odbiciu zwany jest potocznie z ang. „Single Hop”, natomiast w przypadku odbić wielokrotnych „Multiple Hop”. Systemy pozahoryzontalne o dużej mocy mogą obserwować obiekty nawet po przeciwnej stronie kuli ziemskiej.

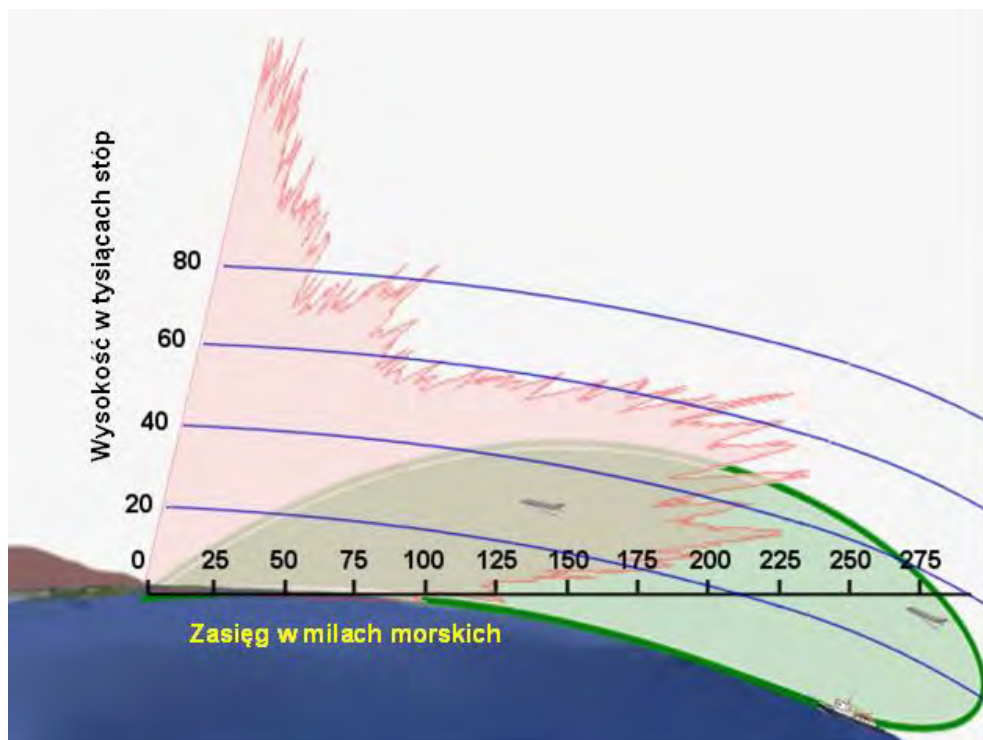
niż typowych stacji radiolokacyjnych pracujących w zakresie mikrofal (Rysunek 3). Fale przyziemne ze względu na charakterystykę propagacji dzielą się na powierzchniowe i przestrzenne:

- a) Fala powierzchniowa (ang. surface-wave) emitowana przez antenę nadawczą rozchodząca się wzdłuż powierzchni ziemi (naśladując jej krzywiznę);
- b) Fala przestrzenna tworzona przez falę bezpośrednią (docierającą do odbiornika będącego w zakresie widzialności optycznej (radiowej) oraz falę odbitą od powierzchni ziemi. W zakresie fal krótkich (HF) wykorzystywana jest wyłącznie fala bezpośrednia, szczególnie w zakresie wykrywania obiektów powietrznych.



Rys. 2. Rodzaje propagacji fal krótkich (HF) – Rysunek na podstawie [Bem D. J., 1973]

Systemy radiolokacyjne pracujące w zakresie fal krótkich na fali odbitej od jonosfery i posiadające dzięki temu zdolności do obserwacji przestrzeni (obiektów) poza krzywizną ziemi (linią horyzontu naturalnego) nazywane są radarami pozahoryzontalnymi (ang. Over-the-Horizon Radar - OTHR). Powstały przede wszystkim, aby zniwelować niedoskonałości radarów pracujących na wysokich częstotliwościach (100MHz i wyższych), których zasięg ograniczony jest naturalnym horyzontem.



Rys. 3. Porównanie sektora obserwacji radaru pozahoryzontalnego HFSWR (zielony) z typowym radarem mikrofalowym (czerwony) [Radartutorial, 2021].

5. PRZEGLĄD ŚWIATOWYCH SYSTEMÓW RADIOLOKACJI POZAHORYZONTALNEJ

Zainteresowanie posiadaniem stacji radiolokacyjnej pozwalającej na wykrywanie i obserwację obiektów położonych poza linią horyzontu pojawiło się dość wcześnie, bo już w latach drugiej wojny światowej. Wynikało to przede wszystkim z rozwoju środków napadu powietrznego, szczególnie pojawienia się strategicznego lotnictwa bombowego, zdolnego do długotrwałych lotów z dość dużą, jak na owe czasy prędkością, co wymagało odpowiednio wczesnego pozyskania informacji o zbliżających się samolotach i uruchomienia lotnictwa myśliwskiego obrony powietrznej. Niemniej jednak pierwsze próby związane z wykrywaniem statków powietrznych przy wykorzystaniu systemu pracującego na falach krótkich zostały podjęte w III Rzeszy Niemieckiej. Zasadniczą trudnością, którą napotkali konstruktorzy była konstrukcja odpowiedniej wielkości systemów antenowych oraz urządzeń niezbędnych dla prawidłowej obróbki sygnału radiowego ulegającego trzykrotnemu odbiciu (od

jonosfery w drodze do celu, od powierzchni celu (lądu lub morza) oraz powtórnie od jonosfery w drodze do odbiornika).

Pomimo olbrzymiego nakładu pracy Niemcy zdołali skonstruować jedynie prototypowy egzemplarz radionamiernika krótkofalowego, który pozwalał namierzać transmisje łączności radiowej prowadzone na falach krótkich. Stosowanie łączności w pasmie HF było szeroko stosowane w lotach dalekodystansowych ze względu na charakterystykę rozchodzenia się fal co pozwalało na utrzymanie komunikacji samolotów bombowych w własnymi bazami na odległość kilkuset kilometrów. Dwa egzemplarze urządzenia noszącego oznaczenie HF 2079 i nazwę „WULLENWEVER” zostały zbudowane na terenie Danii oraz w Niemczech w latach 1943-44.

Po zakończeniu wojny stały się one przedmiotem zainteresowania Aliantów, zarówno tych ze wschodu, jak i z zachodu. O ile duński egzemplarz został po dokładnej analizie zniszczony przez Brytyjczyków, to urządzenie z Niemiec zostało rozebrane na części i ponownie zmontowane w Uniwersytecie stanu Illinois w 1947 roku. Badania nad tym egzemplarzem pozwoliły Amerykanom na zbudowanie dwóch podobnych systemów lokalizacyjnych oznaczonych AN/FRD-10 i AN/FLR-9 [Station Hypo... 2019]. Część dokumentacji oraz średniego personelu technicznego obsługującego radionamierniki została przejęta przez Armię Czerwoną i kontynuowała prace, których efektem była budowa systemów radionamierzenia o nazwie „KRUG”.

5.1. Stany Zjednoczone Ameryki

Dynamiczny rozwój elektroniki następujący w latach 50-ych i 60-ych XX wieku pozwolił na zbudowanie pierwszych „prawdziwych” radarów pozahoryzontalnych. Prace nad nimi prowadzone były równoległe po obu stronach „Żelaznej kurtyny”. W USA pierwsze skuteczne próby radiolokacji pozahoryzontalnej wykorzystującej odbicie fali radiowej od jonosfery podjęto na początku lat 50-ych. Dopiero jednak pozytywne doświadczenia z radarami MADRE i WARF, które rozpoczęły działalność operacyjną w pierwszej połowie lat 60-ych pozwoliły na zbudowanie pierwszego, w pełni działającego radaru pozahoryzontalnego typu 440L, oznaczonego również OTH-F⁶. Był to stosunkowo prosty system pracujący na niemodulowanej fali ciągłej o częstotliwości 5-25MHz ustalający położenie celu na zasadzie triangulacji (całość systemu składała się z pięciu nadajników i czterech odbiorników). Jego obszar obserwacji pokrywał znaczącą część ZSRR od północnych granic Indii na południu do koła podbiegunowego na północy i od wybrzeży Libanu na zachodzie aż do Wysp Japońskich na wschodzie [Laurie P., 1974].

⁶ OTH-F – ang. Over-the-Horizon Forwardscatter. Radar tego typu wykorzystuje impulsy nadajnika umieszczonego z dala od odbiornika, emitowane w kierunku anteny odbiorczej (antena odbiorcza obserwuje przestrzeń w kierunku przeciwnym do fali emitowanej przez nadajnik).

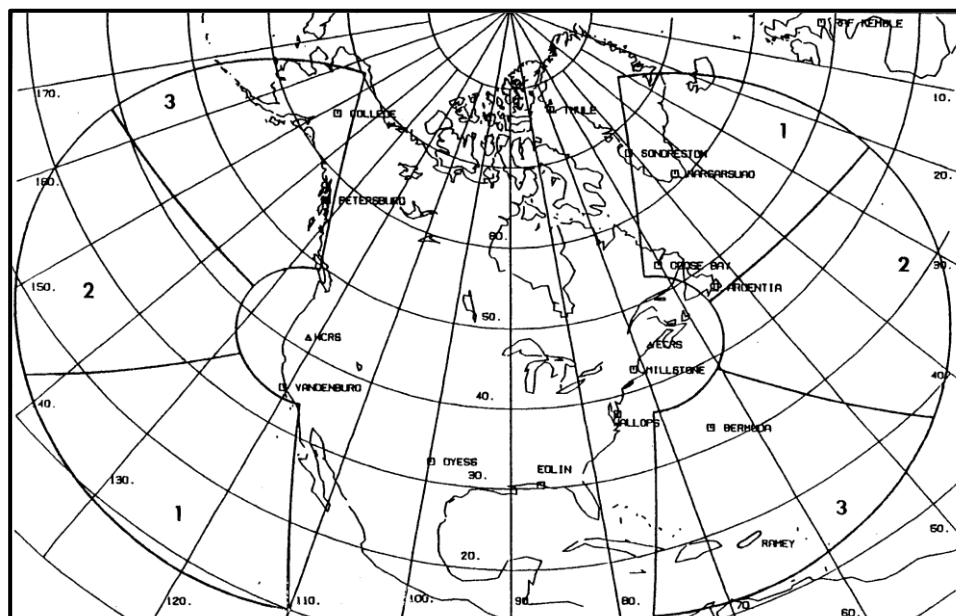
Prace nad radarami pozahoryzontalnymi w USA przebiegały coraz intensywniej na początku lat 70-ych, kiedy rozpoczął się wyścig zbrojeń w kosmosie, a jednocześnie na uzbrojenie weszły nowe, bardziej zaawansowane wersje rakiet międzykontynentalnych. Doprowadziło to do zbudowania pierwszego w USA radaru pozahoryzontalnego pozwalającego wykrywać starty rakiet balistycznych - AN/FPS-95, nazwanego COBRA MIST (System 441A). Radar pracujący na częstotliwości 6-40MHz, wykorzystywał logarymiczno-periodyczną o rozmiarach około 1300x700 metrów i został zbudowany na wschodnim wybrzeżu Anglii w okolicy Orfordness. Dzięki wysokiej mocy promieniowania (3,5MW) przy pojedynczym odbiciu od jonosfery jego zasięg wynosił ponad 3700 kilometrów w sektorze 119° od północnego cypla wyspy Nowa Ziemia na północy do granicy Turcji z Irakiem na południu [Fowle et al., 1979].

Pomimo, że radary 440L i 441A miały szereg wad, ich niewątpliwą zaletą była możliwość wykrywania obiektów na bardzo dużych odległościach, co zyskiwało na znaczeniu w okresie napięć pomiędzy NATO i Układem Warszawskim na początku lat 80-ych ubiegłego wieku. Dodatkowym bodźcem dla rozwoju technologii radarów pozahoryzontalnych stał się dynamiczny rozwój techniki komputerowej pozwalającej na osiągnięcie niespotykanej dotąd jakości obróbki sygnałów radiolokacyjnych. Dzięki zastosowaniu najnowszych technologii zbudowano największy dotąd radar pozahoryzontalny w historii oznaczony AN/FPS-118 (dodatkowo nazwany OTH-B⁷). Całość systemu składała się z anten nadawczych i odbiorczych znajdujących się w sześciu lokalizacjach, po trzy na wschodnim i zachodnim wybrzeżu USA (Rysunek 4).

Głównym zadaniem AN/FPS-118 miało być zapewnienie Siłom Powietrznym Stanów Zjednoczonych monitorowania przestrzeni powietrznej na głębokich podejściach do kontynentalnej części USA oraz wczesne ostrzeżenie o ataku międzykontynentalnymi pociskami balistycznymi ze strony Związku Radzieckiego. AN/FPS-118 był pierwszym i jedynym jak dotąd lądowym systemem radiolokacyjnym pozwalającym na zapewnienie obserwacji radiolokacyjnej wokół granic USA na odległościach od 900 do 5500 kilometrów. W docelowej konfiguracji AN/FPS-118 miał otrzymać jeszcze dwa dodatkowe sektory obserwacji – Centralny zapewniający obserwację przestrzeni aż do Kanału Panamskiego oraz Alaskański, pozwalający monitorować przestrzeń nad północnym Pacyfikiem aż do Kamczatki. Do ich budowy

⁷ OTH-B – ang. Over-the-Horizon Backscatter. Radar tego typu wykorzystuje impulsy nadajnika umieszczonego w rejonie odbiornika (choć niekiedy dość daleko od niego), emitowane w kierunku celu (antena odbiorcza obserwuje przestrzeń w tym samym kierunku, w którym emitowane są impulsy nadajnika).

nie doszło, przede wszystkim ze względu na zmieniającą się sytuację geopolityczną, przede wszystkim rozpad bloku komunistycznego i ocieplenie stosunków ze Związkiem Radzieckim (Rosją)



Rys. 4. Strefy obserwacji radaru AN/FPS-118 (OTH-B) [Dandekar B.S., Buchau J., 1996]

Jak w przypadku większości urządzeń radiolokacyjnych zbudowanych w okresie zimnej wojny jego zadaniem było wykrywanie obiektów (zagrożeń) o charakterze militarnym i zapewnienie wczesnego ostrzegania dla sił zbrojnych zapewniających ochronę dla infrastruktury krytycznej. Wraz ze zmianami w sytuacji bezpieczeństwa, zmniejszonym zagrożeniem dla instalacji militarnych a zwiększonym zagrożeniem ze strony przemytu (narkotyków, dóbr luksusowych i ludzi) lub ataków terrorystycznych nastąpiło przeniesienie części zadań monitorowania zagrożeń dla infrastruktury krytycznej na stronę cywilną.

Równoległe z rozwojem systemu AN/FPS-118 Marynarka Wojenna USA (US NAVY) poszukiwała rozwiązania skupiającego się na zapewnieniu bezpieczeństwa bazom i portom morskim oraz zgrupowaniom uderzeniowym sił morskich. Kluczowym momentem w rozwoju nowego radaru było zamknięcie systemu AN/FPS-118 realizującego zadania na korzyść NORAD⁸. Dowództwo US Navy już w roku 1991 wskazywało na korzystniejsze charakterystyki, szczególnie rozdzielczość nowego, doświadczalnego systemu zbudowanego w stanie Wirginia opartego na technologii wykorzystanej wcześniej w radarze WARF. Otrzymał on oznaczenie AN/TPS-71 i

⁸ Ang. NORAD – North American Air Defense – Obrona Powietrzna Ameryki Północnej.

nazwę ROTH⁹. Niewątpliwym wpływem na ostateczną decyzję miały również koszty koszt budowy systemu (ROTHR – 1784,5 mln USD, podczas gdy OTH-B – 2578,6 mln USD) [United States... 1991]. Kontrakt na budowę nowego systemu podpisano w 1994 roku.

Radary AN/TPS-71 są radarami bistatycznymi¹⁰ wyposażonymi w logarytmiczno-periodyczne sieci antenowe o dużych rozmiarach. Dla przykładu system antenowy radaru ROTHR Wirginia posiada antenę nadawczą składającą się z 23 elementów o łącznej długości 240 metrów i wysokości od 21,5 do 38 metrów¹¹. Ich uzupełnieniem jest nadajnik sondujący stan jonosfery¹². Antena odbiorcza składa się z 372 par anten prętowych o wysokości 5,2 metra rozmieszczonych na szerokości aż 2600 metrów. Odległość między anteną nadawczą a odbiorczą wynosi ponad 130 kilometrów.

Pierwszy z trzech egzemplarzy radaru zbudowano w stanie Wirginia i osiągnął on gotowość operacyjną w kwietniu 1993 roku natomiast drugi system zlokalizowany został w stanie Teksas rozpoczął pracę bojową w lipcu 1995 roku. Trzeci egzemplarz, po latach prób i testów potwierdzających skuteczność radaru pozahoryzontalnego do wykrywania obiektów nad obszarami lądowymi został dyslokowany w Portoryko i osiągnął gotowość do działania w 1999 roku.

W ten sposób stworzono jednolitą strefę obserwacji przestrzeni powietrznej i morskiej w rejonie Zatoki Meksykańskiej, Morza Karaibskiego oraz znacznej części obszaru lądowego Ameryki Północnej. Ze względu na wspomnianą wcześniej zmianę priorytetów w zakresie ochrony infrastruktury krytycznej zasadniczym zadaniem systemu AN/TPS-71 jest wsparcie instytucji państwowych USA w zakresie przeciwdziałania przemytowi, zapewnienie bezpieczeństwa żeglugi (nadzoru nad morskimi liniami komunikacyjnymi w tym zapewnienia ratownictwa morskiego¹³) oraz podwodnych rurociągów i kabli telekomunikacyjnych.

W Zatoce Meksykańskiej znajduje się ponad 3500 instalacji związanych z wydobyciem i transportem ropy naftowej oraz gazu ziemnego. Na wybrzeżu Zatoki oraz na półwyspie Floryda znajdują się także kluczowe dla gospodarki morskiej i handlu USA porty w Houston (port o największym obrocie w całych Stanach Zjednoczonych), Corpus Christi (4 miejsce w USA) czy Beaumont (5 miejsce w USA) [Texas Department... 2022]. Łącznie przez porty znajdujące się nad Zatoką Meksykańską

⁹ Ang. ROTHR - Relocatable Over-the-Horizon Radar – Przenośny Radar Pozahoryzontalny.

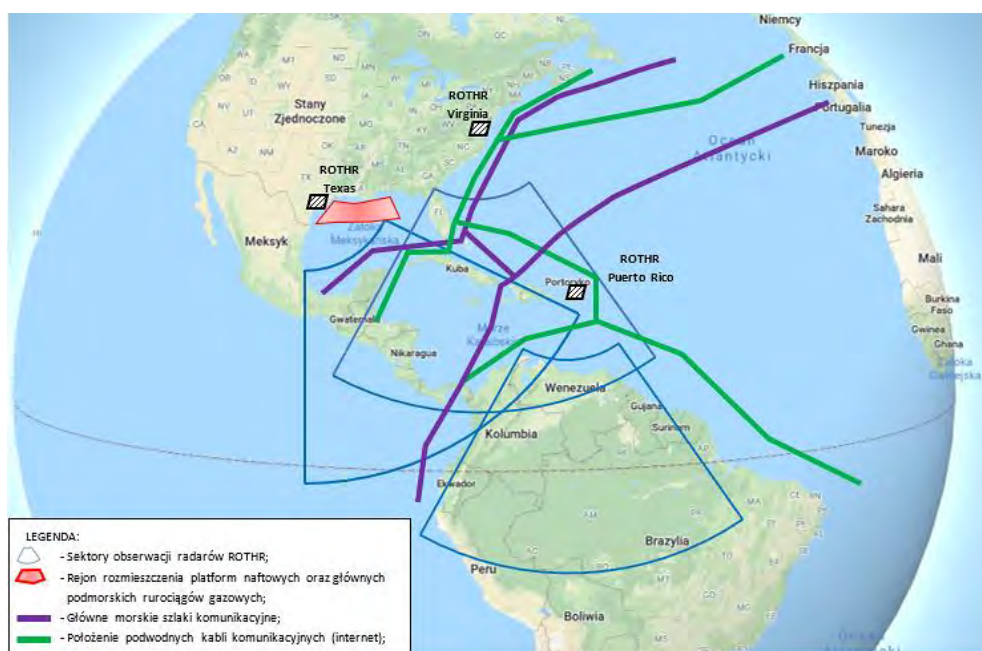
¹⁰ Radar bistatyczny to radar, którego antena nadawcza i odbiorcza znajdują się w różnych lokalizacjach, odległych od siebie o wielkość porównywalną z zakładaną odległością od celu.

¹¹ Wysokość anten jest zależna od zakresu częstotliwości na których emitują sygnał. Niższe anteny pracują w paśmie 17-28MHz, natomiast wyższe w paśmie 5-16MHz.

¹² Nadajnik ten służy do określenia wpływu jonizacji atmosfery na propagację fal radiowych.

¹³ Ang. Search-and-Rescue – SAR.

przebiega około 35 procent całego obrotu Stanów Zjednoczonych a przez basen Morza Karaibskiego przebiegają główne szlaki morskie z Azji do Europy poprzez Kanał Panamski. Na wschodnim wybrzeżu Florydy zlokalizowane są największe skupiska podmorskich kabli telekomunikacyjnych, zapewniających również połączenia internetowe, zmierzające do Europy oraz wzdłuż wschodniego wybrzeża USA a także na południe do Portoryko i dalej do Brazylii (Rysunek 5). Nie bez przyczyny właśnie ten rejon, posiadający wyjątkowe znaczenie dla bezpieczeństwa energetycznego oraz informacyjnego USA znalazł się pod nadzorem systemu posiadającego największe możliwości wykrywania i obserwacji obiektów niewidocznych dla typowych stacji radiolokacyjnych (Tabela 2).



Rys. 5. Rozmieszczenie elementów infrastruktury krytycznej w rejonie Zatoki Meksykańskiej oraz sektory obserwacji radarów systemu ROTHR w tym regionie. Rysunek autora na podstawie [Mikutel T., 2020], [Businessinsider, 2018] [Geography, 2022]

Doświadczenia z budowy radarów pozahoryzontalnych w USA pokazały jeszcze jedną z możliwości wykorzystania tego systemu, tym razem w zakresie wykrywania i ostrzegania o niebezpiecznych zjawiskach pogody. Poprzez zastosowanie impulsu sondującego będącego falą ciągłą z modulacją częstotliwościową i wykorzystaniu efektu Dopplera, radar AN/TPS-71 może wykrywać nie tylko ruchome obiekty w powietrzu czy na lądzie, ale również anomalie na powierzchni morza (spiętrzenia fal sztormowych, fale tsunami) oraz w atmosferze (huragany, trąby powietrzne etc.).

Dzięki temu stanowi uniwersalne narzędzie systemu wczesnego ostrzegania zarówno przed zagrożeniami powodowanymi przez człowieka (militarnymi – samoloty, pociski manewrujące, rakiety balistyczne bądź terrorystycznymi – samoloty lub okręty przejęte w celu wykonania zamachu) jak i naturalnymi.

Tabela 2

Dane taktyczno-techniczne stacji radiolokacyjnej AN/TPS-71 ROTHF na podstawie [Headrick J. M., Thomason J. F., 1998].

Częstotliwość nośna	5 – 28MHz
Częstotliwość modulacji	25kHz
Maksymalna moc w impulsie	200kW
Sektor obserwacji w azymucie (dla jednego sektora)	64°
Rozdzielczość	- w odległości – 6km - w azymucie – 0,5°
Zasięg skuteczny	926 – 3000km

5.2. Rosja

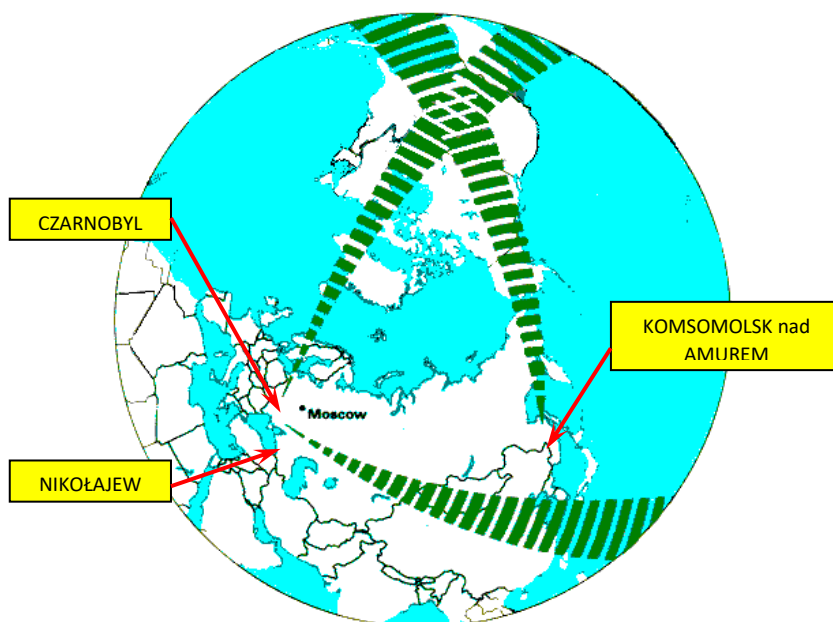
Jak wspomniano wcześniej, część personelu oraz dóbr intelektualnych związanych z niemieckimi konstrukcjami radiolokacyjnymi z okresu 2. wojny światowej dostała się w ręce Rosjan. W latach 50-ych i 60-ych XX wieku rosyjska myśl techniczna w zakresie radiolokacji dalekiego zasięgu ukierunkowana była jednak na bardziej „konwencjonalne” rozwiązania techniczne niż radiolokacja pozahoryzontalna. Wynikało to przede wszystkim z zainteresowaniem podbojem przestrzeni kosmicznej i obserwacją obiektów kosmicznych (w tym międzykontynentalnych rakiet balistycznych) do czego zastosowanie fal krótkich było bezcelowe¹⁴. Jedynym przykładem wykorzystania technologii opartej na falach krótkich była radziecka wersja niemieckiego systemu „WULLENWEVER” nosząca nazwę „KRUG”. Na przestrzeni kilkunastu lat (1951-1965) zbudowano w ZSRR ponad 30 tego typu instalacji stanowiących zasadniczy element rozpoznania dalekiego zasięgu.

Prace nad projektem pierwszego radzieckiego radaru pozahoryzontalnego podjęto w 1961 roku natomiast budowa pierwszego egzemplarza rozpoczęła się w 1965 roku. Radar otrzymał oznaczenie wojskowe 5N77 i nazwę DUGA (w kodzie NATO

¹⁴ Do obserwacji przestrzeni kosmicznej zdecydowanie bardziej nadają się fale ultrakrótkie zakresu 30-300MHz, które nie odbijają się od jonosfery i przy odpowiedniej mocy nadajnika pozwalają na wykrywanie obiektów w odległościach tysięcy kilometrów (ale wyłącznie w zakresie widzialności optycznej anten).

nosił nazwę „STEEL YARD”). Konstrukcja stacji miała umożliwić wykrywanie pocisków balistycznych na podstawie zmian w jonosferze wywoływanych gazami wylotowymi silników raketowych wykorzystując efekt Dopplera na odległościach do 9000km [Dubowski I. N., Kostjuczenko W. I., 2012][Karpenko A.V., 2020]. Jednocześnie stacja DUGA miała wykrywać obiekty powietrzne (w tym pociski skrzydlate BGM-109 TOMAHAWK) i morskie na odległości do 3000km.

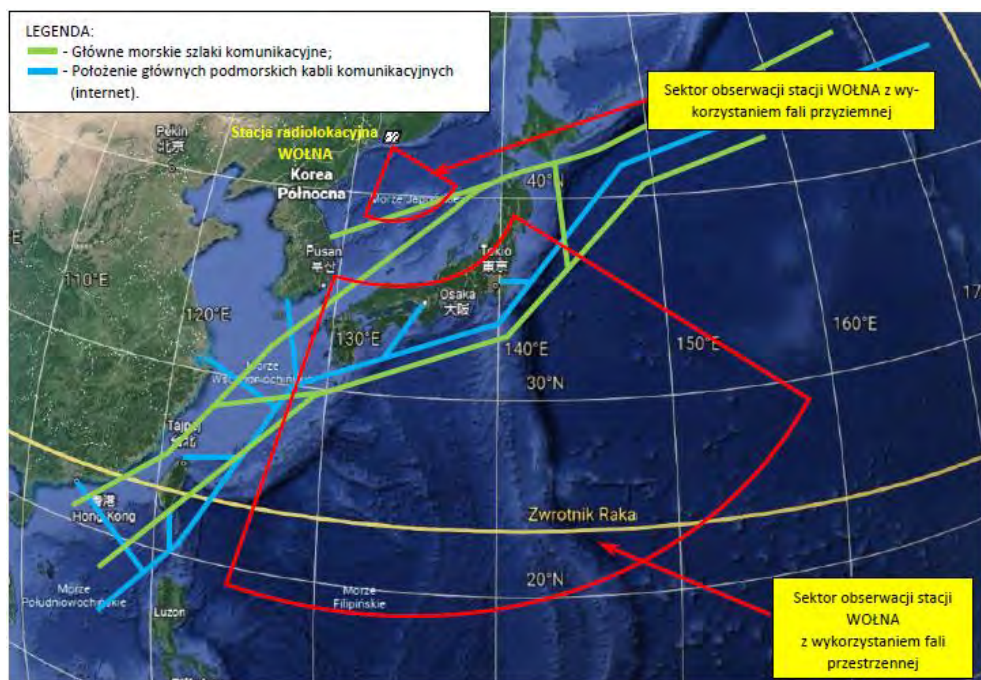
Pierwszy egzemplarz doświadczalny stacji DUGA został zbudowany w rejonie miasta Nikołajew na Ukrainie. Miała ona za zadanie obserwację kierunku południowo-wschodniego (głównie terytorium Chin, chociaż potwierdzono odbiór sygnału radiolokacyjnego nawet z rejonu wyspy Guam) [Vestnik PWO, 2010]. Kolejne dwa egzemplarze stacji radiolokacyjnej DUGA (oznaczone 5N32 a następnie pod zmienionym oznaczeniem 32D6) zostały zbudowane w rejonie Czarnobyla (DUGA-1) i Komsomolska nad Amurem (DUGA-2). Obydwa węzły zostały wyposażone w znacznie większe (zdwojone) systemy antenowe niż stacja testowa w Nikołajewie. Anteny nadawcze miały łączne wymiary około 500x140 metrów, a odbiorcze 800x200 metrów. Odległość między antenami w przypadku stacji w Czarnobylu wynosiła około 60 kilometrów. Stacje miały za zadanie monitorowanie terytorium USA (wykrywanie startów pocisków międzykontynentalnych) poprzez rejon Bieguna Północnego (Rysunek 6). Odległość między węzłami DUGA-1 i DUGA-2 wynosiła około 6800 kilometrów [Dubowski I. N., Kostjuczenko W. I., 2012].



Rys. 6. Sektory wykrywania stacji radiolokacyjnych DUGA [Global Security, 2020]

W związku ze znaczącymi opóźnieniami w budowie stacji oraz w następstwie katastrofy w elektrowni jądrowej w Czarnobylu, która wymusiła zamknięcie tamtejszej stacji DUGA, system nigdy nie osiągnął gotowości operacyjnej i nie został przyjęty przez Siły Zbrojne ZSRR. Stację rozmieszczoną w Komsomolsku nad Amurem zamknięto ostatecznie na początku lat 90-ych ubiegłego stulecia.

Interesującą kontynuacją prac nad radarami pozahoryzontalnymi w ZSRR po zamknięciu projektu DUGA była stacja radiolokacyjna WOŁNA (oznaczeni wojskowe GP-120). Podobnie jak DUGA, stacja WOŁNA składa się z dwóch anten, rozmieszczonych w znacznej odległości od siebie. Antena nadawcza stacji WOŁNA, posiada rozmiary 200x5m, natomiast antena odbiorcza rozmiary 1200x5m. Odległość między nimi wynosi około 85 kilometrów. Stacja WOŁNA jest bardzo unikatową konstrukcją łączącą wykorzystanie fali powierzchniowej i przestrzennej. Jej zadaniem jest obserwacja sytuacji nawodnej i powietrznej z wykorzystaniem fali powierzchniowej na odległościach do 350-400 kilometrów oraz z wykorzystaniem fali przestrzennej odbitej od jonosfery na odległościach do 3000 kilometrów w sektorze około 90 stopni skierowanym na południowy wschód od Władywostoku (Rysunek 7). Taka konfiguracja pozwala na zmniejszenie martwego sektora obserwacji typowych stacji pozahoryzontalnych, pracujących na fali przestrzennej, których bliższa granica obserwacji wynosi około 900 kilometrów.



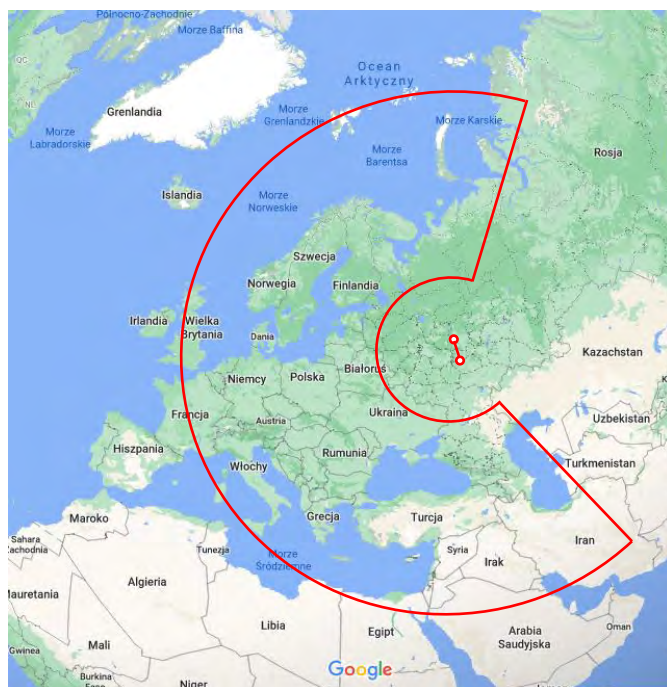
Rys. 7. Sektory obserwacji stacji radiolokacyjnej WOŁNA – Rysunek autora na podstawie [Destroy, 2016][Submarine... 2018]

Radar WOŁNA stanowi obecnie wyposażenie Floty Oceanu Spokojnego Federacji Rosyjskiej zapewniając wczesne ostrzeżenie dla portów i baz wojskowych federacji Rosyjskiej oraz nad Pacyfikiem w rejonie, przez który przebiegają główne szlaki komunikacyjne z Chin, Japonii i Korei na południe oraz północny wschód w kierunku USA.

Pomimo nieudanych doświadczeń ze stacją pozahoryzontalną DUGA, prace nad jej następcą rozpoczęto tuż po wycofaniu z eksploatacji radaru w Komsomolsku nad Amurem. Nowa stacja radiolokacyjna otrzymała nazwę KONTENER (oznaczenie producenta 29Б6) i została wprowadzona na wyposażenie wojsk federacji rosyjskiej w 2013 roku. KONTENER to pozahoryzontalna stacja radiolokacyjna, wykorzystująca podobnie jak w przypadku stacji DUGA falę przestrzenną modulowaną częstotliwościowo w zakresie 3-30MHz¹⁵. Wykorzystuje ona dwie oddzielne sieci antenowe, nadawczą i odbiorczą, z podziałem na dwa segmenty pracujące w osobno w dolnej i górnej części roboczego zakresu częstotliwości. Antena odbiorcza ma wymiary 1300 metrów (szerokość) na 34 metry (wysokość) składa się ze 144 masztów antenowych, wyposażonych w 8 dipoli każdy i zbudowana jest około 6 kilometrów na południowy zachód od miejscowości Kowyłkino (Republika Mordowii). Antena nadawcza rozmieszczona jest 5km na północ od miasta Gorodiec (Obwód Niżnonowogrodzki) ma długość 440 metrów składa się z 36 masztów [Military Russia, 2015]. Odległość między nimi wynosi około 300 kilometrów, czyli pięciokrotnie więcej niż w przypadku radarów DUGA. Stacja prowadzi obserwację zachodniej Europy w sektorze 240 stopni (namiar główny obserwacji wynosi 240 stopni) na odległość ponad 3000 kilometrów z możliwością śledzenia do 500 obiektów jednocześnie (Rysunek 8).

Co ciekawe, w trakcie eksploatacji wypróbowano również prace stacji KONTENER w Mordowii na kierunku wschodnim (na zdjęciach satelitarnych widoczne są elementy anten odbiorczych ustawionych w formie trójkąta równobocznego, co sugeruje, że może ona odbierać sygnały z dowolnego kierunku. Kolejna stacja radiolokacyjna KONTENER, według informacji Agencji TACC, ma zostać zbudowana w Obwodzie Kaliningradzkim, chociaż jej dokładnej lokalizacji nie ustalono. W takim przypadku zasięg stacji kontener pozwoliłby na obserwację obszaru od północnych granic Grenlandii poprzez zachodnie brzegi Portugalii i Maroka aż do północnych wybrzeży Afryki.

¹⁵ Faktycznie sygnały stacji KONTENER były identyfikowane w zakresie 9,2MHz- 19.745 MHz ze skokową, zmianą częstotliwości (50 impulsów na sekundę).



Rys. 8. Zasięg stacji radiolokacyjnej 29B6 KONTENER w początkowej konfiguracji

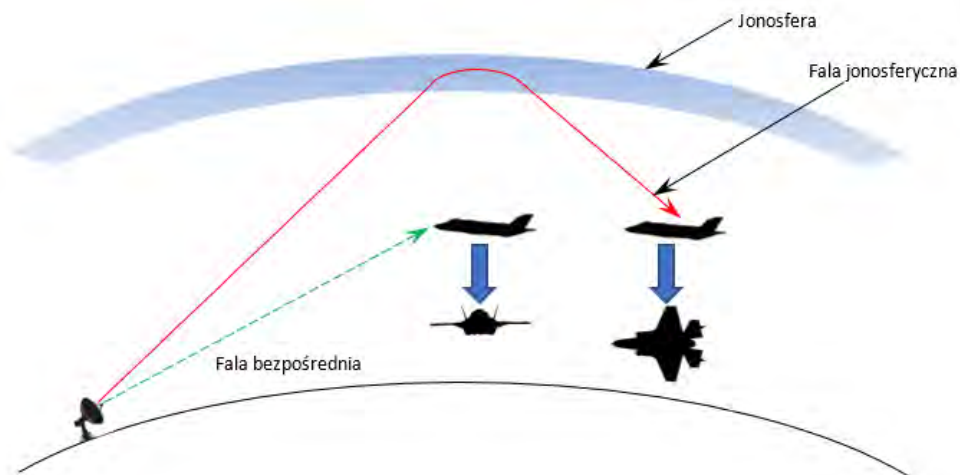
Najważniejszą zaletą stacji Kontener jest według źródeł rosyjskich zdolność do wykrywania i śledzenia różnorodnych obiektów aerodynamicznych (samoloty, śmigłowce i aparaty bezzałogowe, w tym o zmniejszonej powierzchni odbicia, pociski skrzydlate i hipersoniczne) oraz balistycznych. Dotyczy to między innymi samolotów i pocisków o zmniejszonej skutecznej powierzchni odbicia, w tym budowanych w technologii „stealth”¹⁶. Wynika to z założeń przyjętych podczas projektowania tych statków powietrznych dążących do zmniejszenia odbicia radiolokacyjnego podczas lotu w kierunku radaru przeciwnika. W takiej sytuacji impulsy radarowe odbijane są od powierzchni czołowych samolotu (pocisku) oraz wirujące elementy silnika odrzutowego (łopatki sprężarki i turbiny). Konstruktorzy zaprojektowali więc samoloty o specyficznych ostro liniowych kształtach, dodatkowo wyposażone w rozpraszacze energii (deflektory) powodujące odbijanie się fal radiowych w stronę inną niż emitujący je system radiolokacyjny.

Sytuacja jest zgoła odmienna w przypadku radarów pozahoryzontalnych wykorzystujących falę odbitą od jonosfery. Impuls radiowy nie pada wtedy na powierzch-

¹⁶ Do tej grupy statków powietrznych należą między innymi samoloty wielozadaniowe F-22 i F-35, bombowce B-2 oraz samoloty bezzałogowe RQ-170.

nie czołowe samolotu, ale na jego płaszczyznę górną, która stanowi znacznie większą skuteczną powierzchnię odbicia (Rysunek 9). Co więcej, powierzchnie te nie posiadają elementów konstrukcyjnych rozpraszających fale radiolokacyjne, ponieważ powodowałyby zakłócenia opływu aerodynamicznego skrzydeł i kadłuba a tym samym pogarszały charakterystyki operacyjne samolotu (manewrowość, zasięg, pułap lotu etc.).

Najnowsza generacja rosyjskich radarów pozahoryzontalnych typu Podsołnuh (słonecznik) to stacje radiolokacyjne pracujące również w zakresie fal krótkich (HF), lecz wykorzystujące charakterystyczną propagację fali przyziemnej (powierzchniowej)¹⁷, zwaną „efektem Nortona”¹⁸ [Norton K.A., 1935]. Ze względu na charakterystyki promieniowania i propagacji fali powierzchniowej radary takie są najbardziej skuteczne nad obszarami morskimi, z tego też względu ich głównym zadaniem jest monitorowanie sytuacji powietrznej i morskiej w wyłącznej strefie ekonomicznej Rosji.



Rys. 9. Porównanie powierzchni odbicia radiolokacyjnego w przypadku opromieniowania falą bezpośrednią i jonosferyczną (przestrzenną)

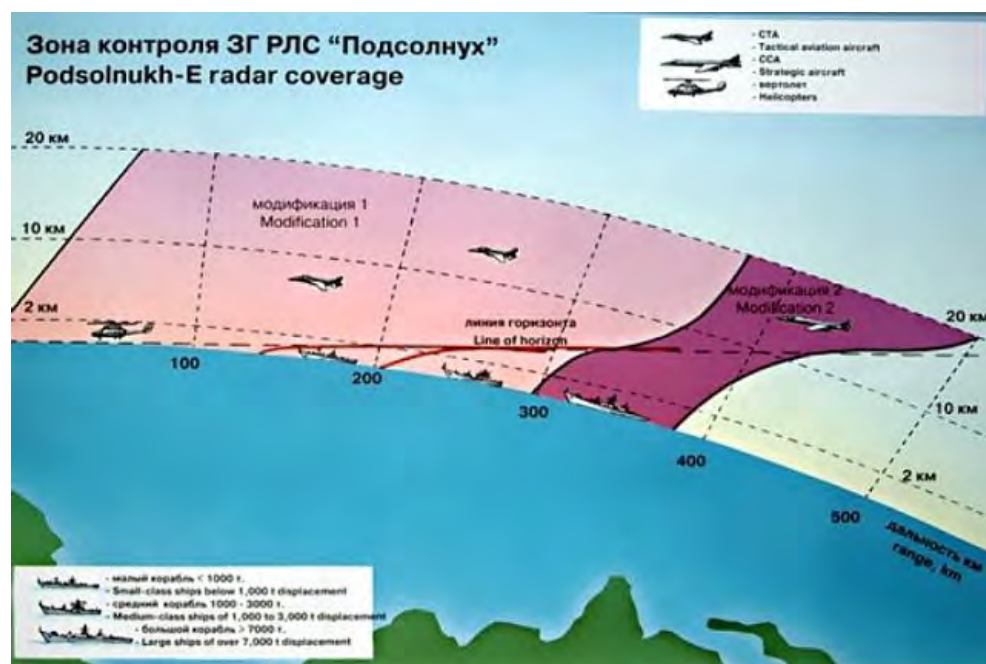
Radar Podsołnuh wykorzystuje zdwojoną logarytmiczno-periodyczną antenę nadawczą o wysokości około 12 metrów oraz antenę odbiorczą składającą się

¹⁷ Ang. HFSWR – High Frequency Surface Wave Radar (Radar pracujący w zakresie fal krótkich na fali powierzchniowej).

¹⁸ W swoim wystąpieniu (liście) do redakcji czasopisma „Nature” K.A. Norton wskazuje, że współczynnik tłumienia fali przyziemnej jest niewielki dla fal o niskich częstotliwościach, szczególnie dla fali radiowej o polaryzacji pionowej, która rozprzestrzenia się wzdłuż powierzchni przewodzącej (w tym przypadku powierzchni ziemi).

z 4 rzędów anten prętowych o wysokości 5 metrów rozmieszczonych na froncie o szerokości około 500 metrów. Odległość między zespołami anten może wynosić od 500 do 1500 metrów. Zaletą radaru Podsołnuh jest możliwość równoczesnego wykrywania i śledzenia obiektów zarówno w zakresie widzialności radiowej (line-of-sight) jak i poza linią horyzontu (over-the-horizon) na maksymalną odległość 500 kilometrów (Rysunek 10). Zmiana sposobu pracy radaru, z fali odbitej od jonosfery na falę powierzchniową zmniejszyła wydatnie zasięg jego działania (Tabela 3), ale jednocześnie uprościła konstrukcję (poprzez kilkukrotne zmniejszenie anten) i obsługę urządzenia (rozwiniecie systemu w terenie zajmuje do 10 dni a jego załoga to tylko 3 osoby) [Global Security, 2020].

Rosja planuje budowę sześciu stacji radiolokacyjnych typu Podsołnuh, które mają należeć do Marynarki Wojennej. Pierwszy, eksperymentalny egzemplarz zbudowany na Kamczatce osiągnął gotowość operacyjną w ramach Floty Oceanu Spokojnego w 2009 roku. Kolejne, do 2013 roku, zostały rozmieszczone na wybrzeżach Morza Ochockiego, Japońskiego i Kaspijskiego. Minimum jeden egzemplarz radaru Podsołnuh został sprzedany do Chin i dyslokowany na wyspie Hainan.



Rys. 10. Strefa obserwacji stacji radiolokacyjnej Podsołnuh [Rosoboronexport, 2020]

Podobnie jak w przypadku radaru KONTENER Rosjanie podkreślają zdolności radaru PODSOŁNUCH do wykrywania samolotów F-22 i F-35 z jednoczesną możliwością śledzenia do 100 obiektów powietrznych i 300 obiektów morskich (nawodnych). Wadą obydwóch wspomnianych systemów jest natomiast brak identyfikacji

„swój-obcy”¹⁹, co wymusza określenie przynależności w sposób proceduralny (dokładne śledzenie trajektorii i parametrów lotu/żeglugi).

Tabela 3

Dane taktyczno-techniczne stacji radiolokacyjnej PODSOŁNUCH na podstawie [Global Security, 2020][Rosoboronexport, 2020]

Częstotliwość nośna	3 – 30MHz
Sektor obserwacji w azymucie	110-120°
Sektor obserwacji w elewacji	0-30°
Rozdzielczość	- w odległości – 1-2km - w azymucie – 1°
Zasięg skuteczny	15 – 450km

Zwiększone zainteresowanie sił zbrojnych Federacji Rosyjskiej radiolokacją pozahoryzontalną, a w szczególności radarami wykorzystującymi falę przyziemną (powierzchniową) wynika z dążenia do kontroli własnej wyłącznej strefy ekonomicznej, ale również z próby wywierania nacisku na inne państwa realizujące interesy narodowe w strefach konfliktowych (kolizyjnych). Jednym z takich obszarów jest na pewno Arktyka. Od kilkadziesiątu lat Rosja rozwija zdolności militarne w tym rejonie, mając na celu, poprzez taktykę faktów dokonanych, zmonopolizowanie wydobycia surowców naturalnych z dna oceanu a także kontrolę żeglugi tzw. Szlakiem Północnym. Wykorzystanie morskich linii komunikacyjnych przebiegających przez Arktykę skraca żeglugę z Azji do Europy nawet i kilkanaście dni, co nie pozostaje bez znaczenia dla światowej ekonomii²⁰.

Wprowadzenie do linii kolejnych stacji radiolokacyjnych dalekiego zasięgu o odmiennych charakterystykach pozwoli Rosji na stworzenie wielowarstwowej jednolitej strefy obserwacji radiolokacyjnej, w której możliwe będzie wykrywanie obiektów powietrznych (kosmicznych) na odległościach do tysięcy kilometrów (realizowane przez radary WORONEŻ) a jednocześnie kontrolowanie przestrzeni powietrznej i morskiej na nieco bliższych odległościach za to bez znaczących ograniczeń wysokości (w strefie bliższej radary Podsołnuh, a w strefie dalszej radary Kontener).

¹⁹ Wynika to z faktu, że systemy rozpoznania swój-obcy pracują na wysokich częstotliwościach (1-2GHz), które rozchodzą się po linii prostej (line-of-sight) i nie osiągają obiektów poza linią horyzontu.

²⁰ Wykorzystanie szlaku Północnego pozwala również na ominiecie kilku stref niebezpiecznych dla żeglugi, takich jak Cieśnina Malakka i Róg Afryki (wysokie zagrożenie piractwem) czy Kanał Sueski (możliwość przypadkowej lub celowej blokady – sabotażu/dywर्सji).

5.3. Australia

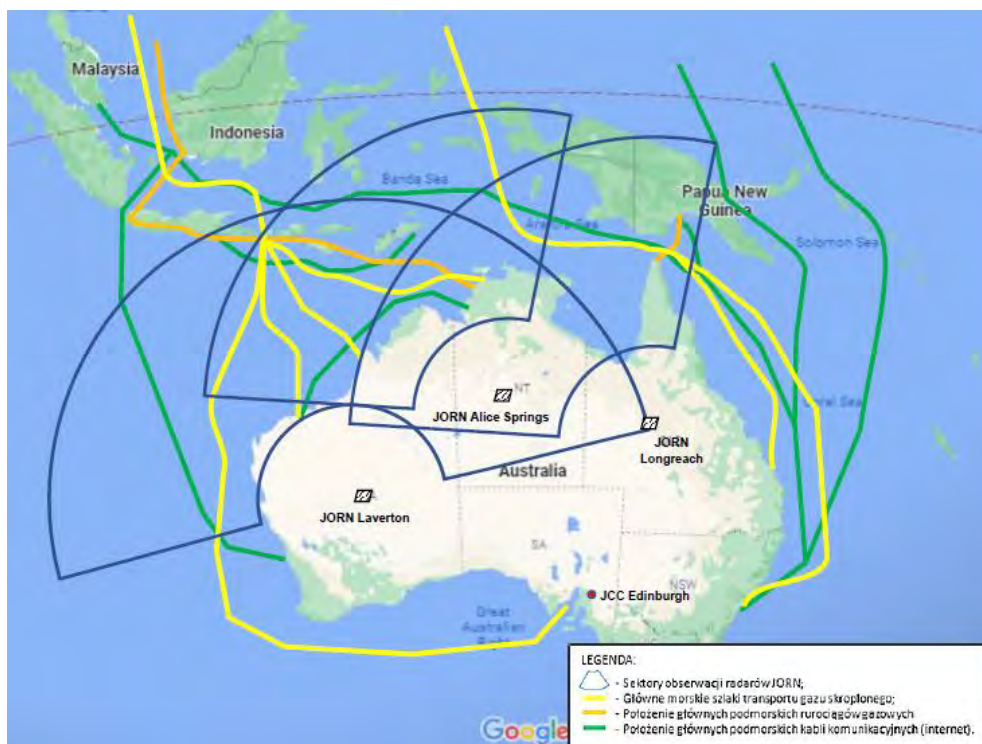
W Australii prace nad skonstruowaniem radaru pozahoryzontalnego rozpoczęto jeszcze w latach 50-ych XX wieku, jednak przez wiele lat nie przynosiły one oczekiwanych rezultatów. Dopiero nawiązanie ściślejszej współpracy z naukowcami i inżynierami z USA, w tym pozyskanie modułów nadawczych amerykańskiego doświadczalnego radaru pozahoryzontalnego typu 440L [Willis N.J., Griffiths H.D., 2007] spowodowało przyspieszenie procesów konstrukcyjnych. W wyniku wspólnych prac w 1972 roku powstał projekt JINDALEE, którego efektem stał się australijski system radiolokacyjny JORN²¹. Jednak z powodu braku wystarczającego zasobu specjalistów z zakresu radiolokacji pierwsze dwie stacje JORN osiągnęły gotowość operacyjną w 1997 roku, a trzecia dopiero w roku 2014.

Głównym zadaniem systemu JORN jest monitorowanie przestrzeni powietrznej i obszaru morskiego na północ od kontynentu Australijskiego, wykrywanie i śledzenie obiektów powietrznych i morskich na dużych odległościach. Obecnie system składa się z trzech zespołów nadawczo-odbiorczych rozmieszczonych w północnych prowincjach Australii oraz centrum kierowania (JORN Coordination Centre – JCC) rozmieszczonego w Bazie Lotniczej Edinburg na południowym wybrzeżu kontynentu (około 30 km na północ od Adelajdy). Pierwszy zespół antenowy (oznaczony „Radar 1”) został zbudowany w prowincji Queensland i zapewnia obserwację w sektorze 90° skierowanym na północny zachód. Drugi zespół antenowy zbudowano w prowincji Australia Zachodnia (Radar 2). Jego sektor obserwacji wynosi 180°, a główny namiar skierowany jest na północ (350°). Najnowszy element JORN (Radar 3) został umieszczony na Terytorium Północnym w miejscu pierwszego doświadczalnego radaru systemu JORN (Alice Springs) i podobnie jak Radar 1 posiada sektor obserwacji 90° z głównym namiarem na północny zachód. Odległości między antenami nadawczymi a odbiorczymi wynoszą od 50 (Radar 2 i 3) do 120 kilometrów (Radar 1). Wzajemna dyslokacja poszczególnych elementów systemu pozwala na wykrywanie obiektów w strefach martwych poszczególnych sektorów i zapewnia monitorowanie sytuacji w rejonach o największym znaczeniu dla bezpieczeństwa energetycznego Australii (Rysunek 11).

Radary systemu JORN pracują na fali ciągłej modulowanej częstotliwościowo w zakresie fal krótkich wykorzystując falę odbitą od jonosfery. Pozwala to na określenie parametrów ruchu obiektów – odległości, azymutu oraz prędkości przemieszczania. Typowa antena nadawcza systemu JORN jest podzielona na dwa podzakresy. System nadający w dolnym paśmie częstotliwości składa się z 14 anten o wysokości 8 metrów, natomiast system nadający w górnej części zakresu składa się z 28 anten o wysokości 15 metrów. Antena odbiorcza składa się z 480 par dipoli (łącznie 960 sztuk) rozłożonych na froncie o szerokości 3100 metrów [Radio... 1998]. Ra-

²¹ Ang. JORN – JINDALEE Operational Radar Network – Operacyjna Sieć Radiolokacyjna „Jindalee”.

dary posiadające takie systemy zapewniają obserwację w zakresie 90 stopni w azymucie (Radar 1 i Radar 3). Radar 2 w Lawerton, dla zapewnienia obserwacji w sektorze 180 stopni, posiada anteny nadawcze i odbiorcze²² o podwójnej liczbie elementów tworzących ramiona ułożone pod kątem prostym. W skład systemu JORN wchodzi także 12 mierników stanu jonosfery rozmieszczonych wzdłuż całego wybrzeża Australii. Dane pozyskane przez te urządzenia pozwalają na tworzenie map jonosfery nad kontynentem w przybliżeniu co cztery minuty.



Rys. 11. Rozmieszczenie elementów infrastruktury krytycznej w rejonie północnej Australii i Indonezji oraz sektory obserwacji systemu JORN – Rysunek autora na podstawie [ADBR, 2019] [ABC News, 2017] [Eurasia Review, 2016]

Podobnie jak w przypadku innych radarów krótkofalowych JORN posiada również zdolności do określania stanu morza (wysokości oraz prędkości przemieszczania się fal), siły wiatru przyziemnego w obszarach odległych o kilka tysięcy kilometrów (Tabela 4), a także pomiarów stanu jonosfery dla potrzeb łączności dalekiego zasięgu [Cameron A. 1995]. Źródła australijskie podają, że system posiada zdolności

²² Antena odbiorcza ma w tym przypadku łączną długość 6200 metrów.

do wykrywania samolotów o zmniejszonej powierzchni odbicia²³. [Engineers Australia, 2016]

Tabela 4

Dane taktyczno-techniczne stacji radiolokacyjnej JORN (pojedynczego sektora) na podstawie [Liu B-Y., 2007]

Częstotliwość nośna	5 – 35MHz
Sektor obserwacji w azymucie	90° (180°)
Moc nadajnika	158kW
Rozdzielczość	- w odległości – 20km - w azymucie – 0,5°
Zasięg skuteczny	1000 – 3000km

5.4. Chiny

Chiny rozpoczęły badania and radarami pozahoryzontalnymi w drugiej połowie lat 60-ych XX wieku. Po początkowym sukcesie związanym z budową pierwszego eksperymentalnego urządzenia prace zostały wstrzymane na kilkadziesiąt lat co było związane z amerykańskim embargiem na dostawy nowoczesnych technologii radiolokacyjnych. Pewnym rozwiązaniem było pozyskanie know-how ze Związku Radzieckiego, ale w zdecydowanej większości Chińczycy zbudowali swoje radary pozahoryzontalne samodzielnie.

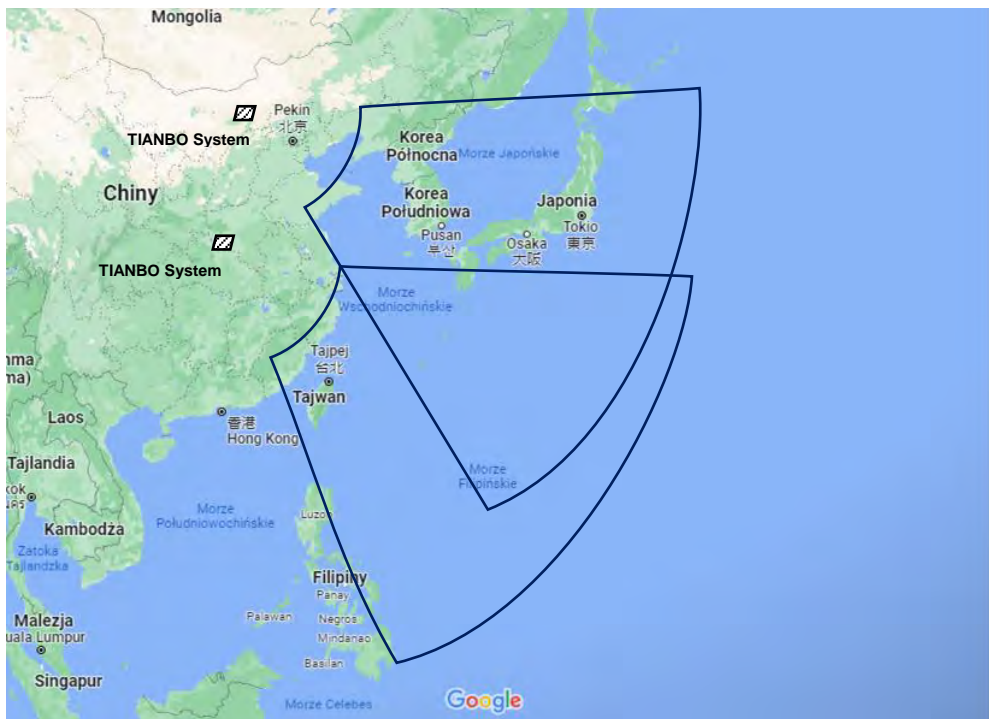
Chińskie radary pozahoryzontalne, zarówno te wykorzystujące falę odbitą od jonosfery, jak i falę przyziemną realizują przede wszystkim zadania wczesnego ostrzegania o zagrożeniach militarnych (wykrywanie i śledzenie lotniskowcowych grup uderzeniowych, pocisków balistycznych, samolotów i pocisków skrzydlatych wykonujących lot na małej wysokości, okrętów etc.). W Chinach jednocześnie rozwijano obydwa rodzaje radarów jako wzajemnie się uzupełniające i pozwalające efektywniej monitorować przestrzeń powietrzną i morską, ponieważ radary pracujące na fali przyziemnej z powodzeniem wypełniają luki w bliższej strefie obserwacji systemów pracujących na fali jonosferycznej, niemożliwe do pokrycia przez systemy radiolokacyjne pracujące na wysokich częstotliwościach.

Pierwszym chińskim radarem pozahoryzontalnym, który osiągnął gotowość operacyjną jest system Tianbo (Projekt 2319) wykorzystujący falę odbitą od jonosfery. Pierwsza stacja radiolokacyjna (System 1) należąca do tego systemu została uruchomiona w 2007 roku. Jego antena nadawcza zlokalizowana jest około 25 kilometrów na północ od miasta Zaoyang, natomiast antena odbiorcza w okolicach Sanlichong (obydwie lokalizacje znajdują się w Prowincji Hube i odległe są od siebie o około

²³ Sytuacja dotyczyła amerykańskich samolotów F-117 wykonujących loty doświadczalne w rejonie Pacyfiku na południe od równika.

110km). Druga stacja (System 2) została uruchomiona w 2017 roku w Prowincji Mongolia Wewnętrzna. Jej antena nadawcza znajduje się w okolicy Naomugeng Sumu, natomiast odbiorcza w Darhan Muminggan w odległości niemal 150km. Istnieją plany budowy trzeciej stacji systemu Tianbo skierowanej na obserwację Morza Południowochińskiego, na którym Chiny dążą do przejścia inicjatywy strategicznej poprzez, między innymi budowę sztucznych wysp stanowiących wysunięte bazy wojskowe.

Radar bistatyczny Tianbo pracuje na fali ciągłej modulowanej częstotliwościowo w zakresie 3-30MHz i posiada skuteczny zasięg wykrywania obiektów powietrznych oraz morskich około 3000 kilometrów. Dzięki temu łączny sektor obserwacji obydwóch stacji pokrywa obszar wokół Wysp Japońskich, Korei, Filipin oraz znaczącej części zachodniego Pacyfiku (Rysunek 12).



Rys. 12. Sektory obserwacji radarów systemu Tianbo – Rysunek Autora na podstawie [Global Security, 2020]

Jak wspomniano wcześniej równolegle rozwijane były systemy wykorzystujące falę przyziemną (HFSWR) przy czym pierwsze informacje o ich istnieniu pojawiły się na początku lat dwutysięcznych. Obecnie funkcjonują cztery posterunki radiolokacyjne wykorzystujące Radary HFSWR rozmieszczone w różnych częściach wybrzeża Chin (Wengzhou, Fuzhou, Zhangpu oraz Guangdong) i posiadają dość proste

układy antenowe. W trzech z nich nadajniki wyposażone są w nadawcze logarytmiczno-periodyczne sieci antenowe (LPAA), natomiast czwarty (Fuzhou) jedynie w dwie anteny logarytmiczno-periodyczne (LPA). Wszystkie cztery posterunki wyposażone są w pojedynczą sieć odbiorczą zbudowaną z anten prętowych. Posterunki posiadające sieci LPAA monitorują przestrzeń w sektorze 120 stopni w azymucie, natomiast posterunek w Fuzhou posiadający zmniejszony system antenowy jedynie w sektorze 60 stopni. Radary wykorzystują falę ciągłą modulowaną częstotliwościowo (o częstotliwości nośnej 3-30MHz) z polaryzacją pionową co pozwala na osiągnięcie zasięgu mniej więcej 300km i wykrywanie obiektów (okrętów, samolotów, również tych o zmniejszonej powierzchni odbicia oraz pocisków przeciwokrętowych i manewrujących) poza linią horyzontu [Global Security, 2020].

Wprowadzenie przez Chiny do służby radarów pozahoryzontalnych nakierowane było przede wszystkim na wykrywanie i identyfikację zagrożeń o charakterze militarnym (w tym obserwację aktywności Amerykańskich baz wojskowych w Japonii i Filipinach a nawet na wyspie Guam). Połączenie zdolności radarów wykorzystujących falę jonosferyczną z systemami pracującymi na fali przyziemnej pozwoliło na stworzenie strefy kontroli radiolokacyjnej wzdłuż całego wybrzeża Chin, przyczyniając się do zabezpieczenia ich interesów w rejonie zachodniego Pacyfiku.

5.5. Inne systemy

Większość radarów pozahoryzontalnych eksploatowanych na świecie, szczególnie tych o największym zasięgu, wykorzystujących fale odbite od jonosfery to systemy wykorzystywane przez siły zbrojne. Wynika to przede wszystkim z zapotrzebowania na dostęp do wczesnego ostrzegania o zbliżających się zagrożeniach dla państwa, jego obywateli oraz infrastruktury. Innym ważnym aspektem są koszty budowy takich instalacji, mierzone często w setkach milionów dolarów, których nie są w stanie ponieść instytucje biznesowe. Pojawienie się prostszych, a tym samym tańszych radarów wykorzystujących falę przyziemną (HFSWR) zwiększyło zainteresowanie takimi urządzeniami po stronie cywilnej.

Pierwsze próby z radarami HFSWR podejmowano na początku drugiej połowy XX wieku i nadal były to przede wszystkim systemy wojskowe. Dopiero upowszechnienie technologii cyfrowych, w tym komputerów zdolnych do analizy i weryfikacji sygnałów radiowych ułatwiło dostęp do technologii radarów pozahoryzontalnych przemysłowi realizującemu zadania na korzyść komunikacji i transportu. Ze względu na specyfikę rozchodzenia się fali przyziemnej, posiadającej większy zasięg nad obszarami morskimi, stały się one podstawowym narzędziem do określania stanu morza (wysokości fal, prądów powierzchniowych oraz kierunku wiatru), nadzoru nad żegluga (w tym również zapewnienia bezpieczeństwa statków i załóg

w niebezpieczeństwie²⁴) oraz ostrzegania o niebezpiecznych zjawiskach pogody (huraganach, falach tsunami).

W ciągu ostatnich 30 lat powstało na świecie kilka tego typu systemów, jednak większość z nich nie została wdrożona do użytku w liczbie większej niż kilka egzemplarzy²⁵. Jedynym radiolokatorem HFSWR, który zyskał szerokie zastosowanie jest niemiecki radar WERA²⁶. Jest to system pracujący na falach krótkich (4-48MHz) wykorzystując falę ciągłą z modulacją częstotliwościową o polaryzacji pionowej. WERA wykorzystuje tzw. „efekt Bragga” który zakłada, że w pewnych warunkach słabe impulsy mogą ulec wzmocnieniu poprzez nakładanie się na siebie (pozytywne interferencja). Dzięki jego wykorzystaniu, pomimo niewielkiej mocy promieniowania (około 30W) Radar WERA dysponuje zasięgiem ponad 200 kilometrów (Tabela 5).

W porównaniu do opisywanych wcześniej stacji radiolokacyjnych WERA posiada bardzo prostą budowę, co ułatwia instalację na niewielkiej przestrzeni i w niekiedy mało dostępnym terenie. System anten nadawczych składa się z czterech anten prętowych, natomiast system anten odbiorczych zbudowany jest z od 8 do 16 anten prętowych (w zależności od warunków lokalnych oraz przeznaczenia danego egzemplarza). Również w zależności od potrzeb użytkownika WERA może pracować na różnych częstotliwościach (lub nawet na podwójnej częstotliwości) i w ślad za tym demonstrować zróżnicowane charakterystyki [Kniephoff M. 2019].

Tabela 5

Dane taktyczno-techniczne stacji radiolokacyjnej WERA na podstawie [Radartutorial, 2019]

Częstotliwość nośna	4 – 48MHz
Sektor obserwacji w azymucie	120°
Moc nadajnika	30W
Rozdzielczość	- w odległości – 100m – 1,5km (w zależności od konfiguracji anten)
Zasięg skuteczny	15 – 250km

Dzięki prostocie konstrukcji oraz elastyczności zastosowania radary WERA funkcjonują w ponad 150 lokalizacjach na świecie (Rysunek 13). Ich głównym za-

²⁴ Ang. Safety of Life at Sea – SOLAS.

²⁵ Na przykład kanadyjski system SWR-503, którego dwa egzemplarze zainstalowano na wschodnim wybrzeżu Kanady a jeden na rumuńskim wybrzeżu Morza Czarnego czy pojedynczy egzemplarz francuskiego radaru Stradivarius.

²⁶ WERA – Niem. **W**ellen **R**Adar – Radar obserwacji fal.

daniem jest dostarczanie informacji związanych z bezpieczeństwem ruchu morskiego oraz warunkami atmosferycznymi w rejonie głównych portów morskich²⁷ i cieśnin²⁸, a przede wszystkim [Radartutorial, 2019]:

- śledzenie obiektów morskich (statków) na dużych odległościach na rzecz bezpieczeństwa państwa;
- zapewnienie informacji żeglugowej i bezpieczeństwa na morzu;
- zapewnienie morskiego poszukiwania i ratownictwa w przypadku zdarzeń losowych;
- ostrzeżenie o klęskach żywiołowych, huraganach i falach tsunami;
- zapewnienie bezpieczeństwa dla infrastruktury morskiej (platform wiertniczych, urządzeń nawigacyjnych etc.);
- ochrona środowiska naturalnego w wyłącznych strefach ekonomicznych.



Rys. 13. Lokalizacje radarów WERA na podstawie [Kniephoff M. 2019]

²⁷ Radar WERA zapewnia bezpieczeństwo żeglugi między innymi w największym europejskim porcie w Rotterdamie oraz pobliskim Hoek van Holland (Niderlandy) oraz francuskiego portu Brest, wokół którego panują bardzo trudne warunki nawigacyjne.

²⁸ Radary WERA rozmieszczone w Zjednoczonych Emiratach Arabskich zapewniają bezpieczeństwo żeglugi w Zatoce Omańskiej, której wody są punktem zapalnym z Iranem.

6. PODSUMOWANIE

Dynamiczne zmiany w sytuacji gospodarczej świata, dążenie niektórych państwa do zawłaszczenia nowych terytoriów (np. Chiny na Morzu Południowochińskim, Rosja w Ukrainie i Arktyce) oraz rosnąca konkurencja gospodarcza stwarzają coraz więcej zagrożeń dla bezpieczeństwa międzynarodowego i wewnętrznego poszczególnych krajów. Sytuacja taka stawia przed wszystkimi instytucjami zadanie ochrony infrastruktury niezbędnej dla funkcjonowania państwa oraz bezpieczeństwa obywateli. Szczególną rolę w tym zakresie pełnią systemy wczesnego ostrzegania, pozwalające na wykrywanie oraz identyfikację zagrożeń, ale również zapewniają czas niezbędny do podjęcia reakcji przez system ochrony krytycznych elementów infrastruktury.

Jednym z najważniejszych elementów SWO są stacje radiolokacyjne dalekiego zasięgu, w tym radary pozahoryzontalne. Pomimo stosunkowo niewielkiej dokładności namierzania systemy pozahoryzontalne są efektywnym uzupełnieniem całego systemu i wydatnie przyczyniają się do zapewnienia nadzoru nad rozległymi obszarami pozostającymi w sferze zainteresowania danego państwa, na przykład Wyłącznymi Strefami Ekonomicznymi, szlakami komunikacyjnymi czy rejonami wydobycia surowców z dna oceanu.

Radary pozahoryzontalne stanowią także podstawowe źródło informacji dla innych systemów monitorowania przestrzeni powietrznej i morskiej o mniejszym zasięgu, ale posiadających zdolności do precyzyjnego naprowadzania i kinetycznego oddziaływania (takich jak systemy przeciwlotnicze, przeciwokrętowe i przeciwrakietowe) na pojawiające się zagrożenia. Kluczowym wymogiem dla ich skutecznego działania jest jednak dostarczenie informacji o zagrożeniach w czasie realnym (lub z minimalnym opóźnieniem) i z jak największym wyprzedzeniem. Systemy pozahoryzontalne dzięki zasięgowi rzędu nawet tysięcy kilometrów oraz zdolności wykrywania nawet niewielkich obiektów (w tym samolotów budowanych w technologii stealth) na rozległych obszarach, mierzonych w milionach kilometrów kwadratowych są doskonałym narzędziem do realizacji takiego zadania.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Bem D. J., 1973, Anteny i rozchodzenie się fal radiowych. WNT, Warszawa.
2. Fabrizio G. A., 2013, High Frequency Over-the-Horizon Radar, Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications. McGraw-Hill Education.
3. Willis N.J., Griffiths H.D., 2007, Advances in Bistatic Radar. SciTech Publishing.

Artykuły w czasopiśmie

1. Dubowski I. N., Kostjuczenko W. I., 2012, История загоризонтной радиолокационной системы «ДУГА», Приволжский научный вестник, № 7 (11), 2012.
2. Laurie P., 1974, An eye on the enemy over the horizon, *New Scientist*, 7 November 1974.
3. Norton K.A. 1935, Propagation of Radio Waves over a Plane Earth. *Nature* 135 (1935), str. 954.
4. RFS Group, 1998, JORN project completed, Stay Connected, *The Radio Frequency Systems Bulletin* 2/98.
5. Rübhelke D., Vögele S., 2010, Impacts of Climate Change on European Critical Infrastructures: The Case of the Power Sector. BC3 Working Paper Series 2010-08. Basque Centre for Climate Change, Bilbao, Hiszpania.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Cameron A. 1995, The Jindalee Operational Radar Network: Its Architecture and Surveillance Capability. IEEE International Radar Conference.
2. Federal Foreign Office, 2006, Developing Early Warning Systems: A Checklist.; Third International Conference on Early Warning, Bonn, Germany, 27-29 March 2006.
3. Headrick J. M., Thomason J. F., 1998, Applications of high-frequency radar; *Radio Science* Volume 33, Number 4, July-August 1998.
4. Kniephoff M. 2019, Introduction the Ocean Radar System WERA Features, Accuracy and Limitations. Proceedings of Dual Use Marine Technologies Workshop in Larnaca, Cyprus.
5. Mikutel T., 2016, Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej, Materiały z konferencji „Lotnictwo dla obronności”; Politechnika Poznańska, s. 317-335.
6. Mikutel T., 2020, Zaawansowane technologie w ochronie morskich szlaków komunikacyjnych jako nietypowych elementów infrastruktury krytycznej. Materiały z konferencji „Lotnictwo dla obronności i środowiska”; Politechnika Poznańska.

Ustawy

1. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz. U. z 2022 r. poz. 261, 583).

Opracowania i raporty z badań

1. Dandekar B.S., Buchau J., 1996, The AN/FPS-118 Radar Chapter 5, OTH Handbook, Air Force Materiel Command, 11 January 1996.
2. Fowle E.N., Key E.L., Millar R.I., Sear R.H., 1979, The Enigma of the AN/FPS-95 OTH Radar (U), ARPA, 22 May 1979.
3. Liu B-Y. 2007, HF Over-the-Horizon Radar System Performance Analysis. Naval Postgraduate School, Monterey.
4. United States General Accounting Office, 1991, Over-the-Horizon Radar Better Justification Needed for DOD Systems' Expansion, Washington, D.C., 16 January 1991.

Komunikaty Internetowe

1. ABC News, 2017, Submarine cables map, www.abc.net.au, (dostęp 01.07.2022).
2. ADBR, 2019, Feature Story – Australia's world-leading Jindalee Operational Radar Network (JORN) is undergoing a refresh to keep it at the leading Edge, <https://adbr.com.au>, (dostęp 01.07.2022).
3. Bureau of Meteorology, Space Weather Services Australia, Introduction to HF Radio Propagation, www.sws.bom.gov.au, (dostęp 08.04.2021).

4. Businessinsider, 2018, The internet's worst-case scenario finally happened in real life: An entire country was taken offline, and no one knows why, www.businessinsider.com, (dostęp 30.06.2022).
5. Destroy, 2016, ZGRLS Volna, <http://dv-destroy.at.ua>, (dostęp 08.04.2021).
6. Engineers Australia, 2016, Jindalee.Nomination.V14, <https://portal.engineersaustralia.org.au> (dostęp 30.06.2022).
7. Eurasia Review, 2016, Asia's LNG Market Breaking Down, Reform Comes Next – Analysis, www.eurasiareview.com (dostęp 01.07.2022).
8. Geography, Trade Routes, <https://geography.name>, (dostęp 07.07.2022).
9. Global Security, 2020, 5N32 Duga [Arc] Steel Yard OTH., www.globalsecurity.org, (dostęp 21.12.2020).
10. Global Security, 2020, Over-The-Horizon Surface Wave Radar (HFSWR), <https://www.globalsecurity.org>, (dostęp 10.07.2022)s
11. Global Security, 2020, Podsolnukh, www.globalsecurity.org, (dostęp 15.12.2020).
12. Global Security, 2020, Project 2319 Tianbo [Sky Wave] Over-the-Horizon Backscatter Radar [OTH-B]. <https://www.globalsecurity.org>, (dostęp 08.05 2021).
13. Karpenko A.V., 2020, Over-the-Horizon Radar 5N77 AND 5N32 System DUGA, <http://bastion-karpenko.ru>, (dostęp 10.11.2020).
14. Military Russia, 2015, 29Б6 Контейнер. <http://militaryrussia.ru>, (dostęp 11.04 2021).
15. Radartutorial, 2019, Over-the-Horizon Surface Wave (OTH-SW) Radar, www.radartutorial.eu, (dostęp 28.03.2021).
16. Radartutorial, 2019, Over-the-Horizon oceanography radar WERA, <https://www.radartutorial.eu> (dostęp 16.06.2020).
17. Rosoboronexport, 2020, Podsolnukh-E, <http://roe.ru>, (dostęp 15.12.2020).
18. Station Hypo, 2019, Early Direction Finding: From WWI Through the Cold War; <https://stationhypo.com>, (dostęp 08.04.2021).
19. Submarine Cable Networks, 2018, SJC-2, <https://www.submarinenetworks.com>, (dostęp 17.06.2022).
20. Texas Department of Transportation, Texas Ports 2022, www.txdot.gov, (dostęp 17.06.2022).
21. United Nations International Strategy for Disaster Reduction 2006, Basics of early warning, www.unisdr.org, (dostęp 25.04.2021).
22. Vestnik PWO, 2010, Загоризонтная РЛС "ДУГА"., <http://pvo.guns.ru>, (dostęp 15.11.2020).

**OVER-THE-HORIZON EARLY WARNING RADARS IN THE PROTECTION OF
CRITICAL INFRASTRUCTURE****Abstract**

This article presents some aspects of critical infrastructure protection. Key role in the task is played by early warning systems capable of detection and identification of incoming threats as well as providing support to the national Crisis Management System. Important part of the early warning system are long range radars, specifically those providing beyond-the-horizon detection capability. Technical characteristics and selected examples of operational employment of over-the-horizon radars are presented in the paper. This includes long range air and maritime surveillance in support of state authorities as well as protection of widely defined national interests.

Key words: critical infrastructure, early warning, over-the-horizon radar.

Mateusz NOWAK*
Przemysław PIEKARCZYK

URZĄDZENIA STOSOWANE DO KONTROLI BEZPIECZEŃSTWA W PORTACH LOTNICZYCH

Ponieważ środki transportu lotniczego, a przede wszystkim samoloty wielokrotnie były miejscem ataków terrorystycznych, istotne jest skuteczne wykrywanie niebezpiecznych ładunków, które mogą zostać wykorzystane do działań o charakterze terrorystycznym. W tym celu stosuje się rozmaite systemy bezpieczeństwa w obrębie portów lotniczych. Celem niniejszej pracy było przedstawienie systemów bezpieczeństwa stosowanych do kontroli bagażu podręcznego w portach lotniczych. Niniejsza praca stanowi syntetyczny opis urządzeń stosowanych w portach lotniczych na drodze kontroli bagażu wraz z omówieniem ich zasady działania.

Słowa kluczowe: porty lotnicze, kontrola bezpieczeństwa, techniczne systemy bezpieczeństwa

1. WPROWADZENIE

Transport lotniczy jest jedną z najbardziej, jeśli nie najbardziej, dynamicznie rozwijającą się gałęzią transportu. Z roku na rok z usług linii lotniczych korzysta coraz większa liczba pasażerów. Dla przykładu Polskie Linie Lotnicze LOT w 2019 roku przewiozły ponad 1,4 miliona pasażerów więcej w stosunku do roku poprzedniego co oznacza że przyrost wyniósł 14%. Ludzie przekonują się do tego rodzaju komunikacji ze względu na szybkość z jaką mogą się dzięki niej przemieszczać, małe generowane zanieczyszczenie środowiska, w porównaniu z przykładowo transportem drogowym, oraz na największe bezpieczeństwo przewozów [Badyda 2010]. Obecnie ruch lotniczy jest mocno ograniczony ze względu na panującą pandemię koronawirusa, stanowi to duże zaburzenie w ruchu lotniczym, jednak jest to stan przejściowy po którym z pewnością liczba pasażerów będzie zdecydowanie większa. W związku z rosnącą liczbą osób chcących korzystać z usług linii lotniczych, rośnie

* Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu.

także ryzyko zagrożeń związanych z próbami wniesienia na pokład bagażu z zabronioną zawartością, które bezpośrednio mogą przyczynić się do powstania zagrożenia. Przykładem takiej sytuacji może być katastrofa lotu linii Pacific Southwest Airlines z dnia 7 grudnia 1987 roku. Jeden z pasażerów zdołał wnieść na pokład rewolwer, którego użył aby wtargnąć do kokpitu samolotu. Po wtargnięciu, zastrzelił dwójkę pilotów po czym pchnął wolant do przodu doprowadzając do nagłej utraty wysokości i wprowadzenia samolotu w lot nurkowy, co bezpośrednio doprowadziło do katastrofy w wyniku której zginęły 43 osoby, wszystkie znajdujące się na pokładzie.

Standardy prawne dotyczące bezpieczeństwa zmieniały się wraz z rozwojem lotnictwa, jednak głównym celem międzynarodowych konwencji prawnych, jest ujednolicenie obowiązujących zasad panujących w lotnictwie. Przykładem dokumentu regulującego procedury dostępu do strefy zastrzeżonej jest Załącznik 17 „Ochrona międzynarodowego lotnictwa cywilnego przed atakami bezprawnej ingerencji”. Został ustanowiony przez Międzynarodową Organizację Lotnictwa Cywilnego (ICAO) i stanowi źródło wiedzy w zakresie bezpieczeństwa portów lotniczych.

Celem prezentowanej pracy jest dokonanie przeglądu technicznych systemów bezpieczeństwa na drodze kontroli bagażu podręcznego w portach lotniczych.

2. TECHNICZNE SYSTEMY BEZPIECZEŃSTWA

2.1. Skanery rentgenowskie

Skanery rentgenowskie (Rys. 1) czyli podstawowe urządzenie służące do kontroli bezpieczeństwa znajdujące się w każdym porcie lotniczym. Skanery te prześwietlają posegregowaną zawartość bagażu, a pracownik je obsługujący na podstawie podglądu na monitorze ocenia czy w prześwietlanych przedmiotach nie znajdują się ukryte substancje niebezpieczne. Są one najczęściej połączone z całą linią obsługi, gdzie na początku dokonywana jest segregacja bagażu a potem taśmociągiem przechodzi on przez skaner a następnie, po pomyślnej kontroli może wrócić do właściciela. Nieodłącznym elementem pracy na tego typu urządzeniach jest aspekt pracy na urządzeniach wymagających szczególnej uwagi. Oznacza to że pracownik obsługujący taki skaner pracuje w ściśle określonych zmianach i przerwach między nimi. Najczęściej wynoszą one nie więcej niż od 15 do 20 minut, a przerwy między nimi od 45 minut do godziny. Przykładowo w Porcie Lotniczym Poznań-Ławica pracownicy obsługujący skanery RTG pracują na nich jedynie 15 minut a po tym czasie przez minimum 45 minut muszą wykonywać inne obowiązki np. kontrole manualne.



Rys. 1. Przykładowy skaner wraz z przykładem generowanego obrazu [astrophysics.pl]

Kontrola polega na przeprowadzeniu przez wiązkę zawartości bagażu posortowanej według określonego porządku. Segregacja jest bardzo ważna ponieważ tylko wtedy obraz uzyskany na monitorach urządzenia będzie wyraźny i kontroler będzie mógł ocenić czy bagaż nie zawiera przedmiotów i substancji niedozwolonych. Poprawna segregacja zapobiega także sytuacji w której, przykładowo urządzenia elektroniczne leżą na sobie co uniemożliwia dokonanie poprawnej kontroli, przez co bagaż musi trafić z powrotem na początek linii kontroli bezpieczeństwa aby przejść przez wykrywacz ponownie. Może to powodować spore opóźnienia. W zależności od tego co przechodzi przez wiązkę promieniowania, pochłania różną jego ilość. Ilość ta zależy od grubości i gęstości przedmiotu oraz od liczby atomowej jego składników. Gdy przechodzi on przez wiązkę, promieniowanie jest absorbowane a do detektora dociera tylko energia resztkowa. Rozpoznanie materiałów i wyświetlenie ich na ekranach jest wynikiem różnic w absorbowaniu promieniowania rentgenowskiego przez kontrolowany przedmiot.

Tabela 1
Przykładowa tabela wyświetlanego koloru zależnego od liczby atomowej materiału [astrophysics.pl]

Liczba atomowa	Typ materiału	Kolor	Przykłady	Możliwe zagrożenia
0-8	Organiczny	pomarańczowy	Drzewo, olej	C4, TNT
8-10	Niski nieorganiczny	pomarańczowy	Papier	Kokaina
10-12	Wysoki organiczny	zielony	Szkoło	Paliwa
12-17	Lekkie metale	zielony	Aluminium	Proch, broń
17-29	Ciężkie metale	niebieski	Żelazo, stal	Naboje, broń
29+	Metale gęste	niebieski	Złoto, srebro	Przemyt złota
-	Nieprzenikalne	czarny	Ołów	Ukrywanie zagrożeń

2.2. Urządzenie do wykrywania materiałów wybuchowych

Kolejnym typem obiektów stosowanych w kontroli bezpieczeństwa są urządzenia do wykrywania śladowych ilości materiałów wybuchowych i narkotyków ETD (Explosive Trace Detection). Mają one za zadanie wykrycie nawet minimalnych ilości materiałów zakazanych w bagażu jak i na skórze czy ubraniu pasażera (rys. 2). Urządzenia tego typu mogą pracować zazwyczaj w dużych zakresach ciśnieniowo-temperaturowych. Kontrola na tych urządzeniach najczęściej jest wrywkowa, a o tym czy pasażer zostanie jej poddany odpowiada system operacyjny. Kontrola nie trwa długo, w zależności od producenta wynik badania podawany jest po kilku lub kilkunastu sekundach.

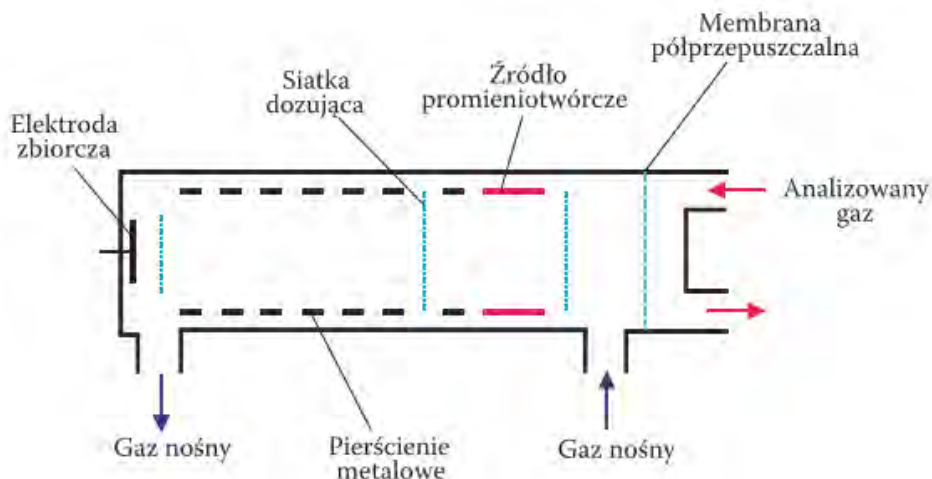


Rys. 2. Przykładowe urządzenie ETD [tsatrace.com]

Wykrywanie niedozwolonych substancji polega na technice analitycznej nazwanej spektrometrią ruchliwości jonów (IMS z ang. Ion Mobility Spectrometry) której podstawą jest pomiar ruchliwości zjonizowanych cząsteczek w gazie buforowym pod wpływem pola elektrycznego. Urządzenia IMS są różnych rozmiarów i mogą pracować w wielu zakresach ciśnieniowo-temperaturowych. Technika ta została opracowana w latach 1890-1910, i znalazła zastosowanie w celach militarnych do detekcji fosforoorganicznych substancji toksycznych. Spektrometry IMS są także w stanie wykrywać część toksycznych substancji przemysłowych.

Spektrometr zbudowany jest z komory podzielonej na dwa obszary (rys. 3). Pierwszym obszarem jest powierzchnia od membrany półprzepuszczalnej do siatki dozującej, drugi to tzw. obszar dryftowy czyli powierzchnia od siatki dozującej do elektrody zbiorczej (rys. 3). Zasa działania polega na doprowadzeniu do siatki dozującej wysokiego napięcia (z reguły od 1,5 kV do 3 kV). Pierścienie metalowe są posiadają coraz niższe potencjały w kierunku od źródła do elektrody zbiorczej. Powoduje to że takie ukształtowanie pola że jony od obszaru jonizacji przemieszczają się po

torach liniowych do elektrody zbiorczej. Prąd wytworzony w komorze docierający do elektrody ma wartość setek pikoamperów [Maziejuk i Mierczyk 2007].



Rys. 3. Schemat konstrukcji spektrometru ruchliwości jonów [Maziejuk i Mierczyk 2007]

2.3. Skanery substancji płynnych

Przepisy dotyczące przewozu substancji płynnych jednoznacznie opisują zasady ich przewożenia. Wedle nich każdy pasażer może posiadać przy sobie nie więcej niż jeden litr płynów (w tym wszelkiego rodzaju kremy, emulsje, pasty itp.), jeżeli umieszczone są one w pojedynczych pojemnikach nie przekraczających 100 ml pojemności. Zasady te są poparte badaniami naukowymi, wedle których z takiej ilości materiałów nie można wyprodukować ładunku wybuchowego, mogącego realnie zagrozić życiu i zdrowiu pasażerów oraz uszkodzić czy zniszczyć samolot. Zdarzają się jednak sytuacje kiedy pasażer musi przewieźć ze sobą więcej niż 100 ml w pojedynczym pojemniku (np. mleko dla małych dzieci). W takich sytuacjach konieczne jest przebadanie zawartości przewożonego płynu za pomocą skanera substancji płynnych (rys. 4). Skanery są łatwe w obsłudze, aby dokonać detekcji cieczy należy odlać niewielką ilość płynu do specjalnej próbówki i umieścić ją w skanerze. Badanie trwa od kilku do kilkunastu sekund. W urządzeniach nowszej generacji nie ma potrzeby pobierania próbki cieczy tylko można umieścić w skanerze całe opakowanie z cieczą którą chcemy przeanalizować w zakresie pojemności od kilkunastu do kilku tysięcy mililitrów.

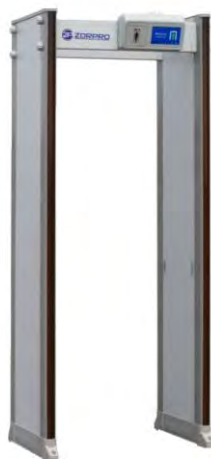


Rys. 4. Przykładowy skaner cieczy [ceia.net]

Urządzenia do analizy substancji płynnych do działania wykorzystują zjawisko spektroskopii Ramana które jest szeroko wykorzystywana w jakościowej i ilościowej analizie ciał stałych, cieczy i gazów. Zapewnia ona dużą liczbę uzyskiwanych informacji przy stosunkowo niskich kosztach oraz dużą dokładność pomiarów. Jest niedestrukcyjna wobec badanych substancji.

2.4. Bramki magnetyczne

Bramki magnetyczne (rys. 5) to chyba najbardziej rozpoznawalne urządzenia w portach lotniczych i innych miejscach wymagających kontroli bezpieczeństwa. Służą do wykrywania przedmiotów metalowych w ubraniu lub w ciele osoby kontrolowanej. Podstawowe bramki wykrywają jedynie obecność metali jednak istnieją dużo bardziej zaawansowane które mogą wykrywać także płyny, ceramikę czy tworzywa sztuczne. Wszystkie generują określone fale które są zakłócone przez odpowiedni materiał i sygnalizowane przez urządzenie sygnałem dźwiękowym. Bramki WTMD nie wymagają szkoleń do ich obsługi a kontrola polega na przejściu osoby kontrolowanej przez bramkę w celu wykrycia ewentualnych materiałów i substancji niebezpiecznych. Urządzenia te są w pełni bezpieczne dla zdrowia ponieważ czas oddziaływania pola to zaledwie 1-2 sekundy. Nawet zmiana częstotliwości pola nie wpływa negatywnie na zdrowie. Kontrola przez te urządzenia jest obowiązkowa dla każdego pasażera jednak obsługa lotniska zezwala ominąć bramki wykrywające przez osoby z rozrusznikami serca lub kobiety w ciąży. Zaleca się jedynie aby takie osoby przechodziły przez wykrywacz normalnym krokiem i nie zatrzymywały się wewnątrz. Jeśli jednak osoby takie mimo wszystko zechcą ominąć bramkę skierowane zostaną na kontrolę przy użyciu ręcznego wykrywacza.



Rys. 5. Przykładowa bramka magnetyczna [zorpro.com]

Bramki magnetyczne wykrywające metale działają na zasadzie indukcji elektromagnetycznej. Przechodzący przez bramkę pasażer zostaje na chwilę poddany oddziaływaniu fal zmiennego pola elektromagnetycznego. Nowoczesne urządzenia WTMD wykorzystują detektory typu VLF czyli o niskiej częstotliwości (*Very Low Frequency*). W ich obudowie znajdują się cewki nadajnika i odbiornika. Zakłócenie odbieranego sygnału uruchamia alarm optyczny i/lub akustyczny. Są one na tyle precyzyjne że potrafią określić jaki typ materiału ma być wykrywany a jaki może zostać zignorowany. Ważny jest także próg czułości, od niego zależy liczba niepożądanych fałszywych alarmów które zmniejszają przepustowość kontroli.

2.5. Ręczne detektory metali

Uzupełnienie dla bramek WTMD stanowią ręczne detektory (rys. 6) do wykrywania metali HHMD (*Hand Held Metal Detection*). Generują one bardziej skoncentrowane pole elektromagnetyczne, dzięki czemu obsługa łatwo może zlokalizować dokładne miejsce powodujące aktywację detektora. Urządzenia te charakteryzują się długim czasem pracy; nawet do kilkunastu dni na jednorazowym doładowaniu. Po wykryciu odpowiedniego materiału wydają alarm świetlny i/lub dźwiękowy. Średni zasięg detekcji waha się w granicach kilkunastu centymetrów. Odległość z jakiej mogą wykrywać obiekty metalowe i metaliczne to około 25 cm dla większych obiektów takich jak broń, 15 cm dla przedmiotów średniej wielkości np. noże, oraz drobne elementy takie jak biżuteria z bliskiej odległości poniżej 5 cm. Podobnie jak bramki

WTMD urządzenia te dzięki technologii mikroprocesorowej nie wymagają manualnego, regularnego strojenia czułości ponieważ kalibracja jest automatyczna [Magnieszewski 2020]



Rys. 6. Przykładowy skaner HHMD firmy Garrett [adorama.com]

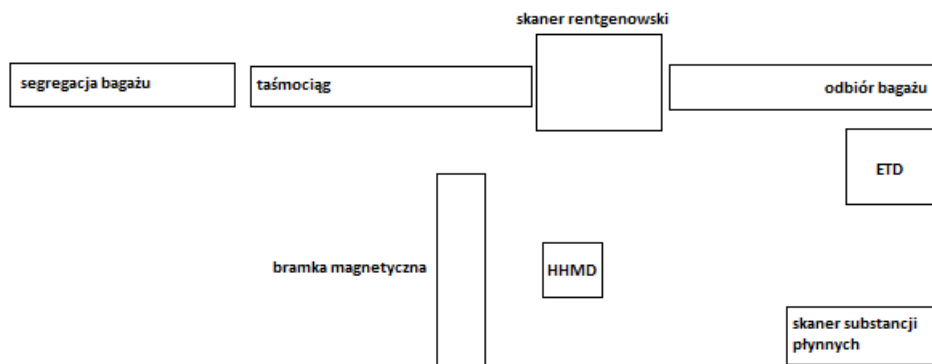
Imiona i nazwiska autorów artykułu umieszcza się w kolejności odpowiadającej udziałom danej osoby w powstaniu artykułu. Składamy je czcionką Times New Roman 11 punktów, imię czcionką tekstową, nazwisko wersalikami, np. Jan NOWAK. Jeżeli artykuł ma współautorów, to każde imię i nazwisko umieszczamy w oddzielnym wierszu.

Nazwy jednostek, z których pochodzą autor/autorzy składamy w stopce artykułu, w formie przypisu dolnego. Format numeracji to: *, **, *** itd. Zapisujemy te informacje według zasady: nazwa instytutu/katedry, nazwa jednostki, z której pochodzą autor/autorzy. Jeżeli autorzy pochodzą z tej samej jednostki, to wystarczy jedna informacja o miejscu pochodzenia. Jeżeli autorzy są z innych jednostek, kolejne informacje umieszczamy od nowego wiersza.

3. PODSUMOWANIE

W przedmiotowej pracy zaprezentowana została analiza systemów kontroli bezpieczeństwa na drodze bagażu podręcznego w portach lotniczych. Przedstawione zostały wszystkie urządzenia stosowane podczas kontroli, wraz z opisem ich zasady działania. Jak można zauważyć kontrola bezpieczeństwa wykorzystuje wiele zjawisk fizycznych w celu wykrycia przedmiotów, które mogłyby stanowić niebezpieczeństwo na pokładzie samolotu. Oczywiście pojedyncze urządzenia, które zostały zaprezentowane w pracy stanowią tylko fragment linii kontroli bezpieczeństwa. Pełen proces oceny bezpieczeństwa wymaga szeregu urządzeń, umożliwiających przeba-

danie bagażu pod kątem obecności różnych możliwych materiałów. Przykładowy schemat linii kontroli bezpieczeństwa przedstawiono na Rys. 7. Ważnym elementem pracy było także stworzenie projektu linii kontroli z wykorzystaniem urządzeń do skanowania bagażu obu stosowanych obecnie generacji.



Rys. 7. Schemat linii kontroli bezpieczeństwa [opracowanie własne]

Przedstawiona linia kontroli bezpieczeństwa w porcie lotniczym pozwala uzmysłowić, o ile bardziej należy rozbudować infrastrukturę portu lotniczego w stosunku do sytuacji, gdyby nie występowało zagrożenie w postaci ataku terrorystycznego podczas podróży lotniczych. Co więcej, w obrębie portów lotniczych o dużym natężeniu ruchu pasażerskiego, konieczne jest zapewnienie kilku linii kontroli bezpieczeństwa, aby zapewnić odpowiednią przepustowość. Na tej podstawie można wyciągnąć wnioski, że rozwiązaniem tego problemu mogą być urządzenia, które będą łączyć funkcjonalność kilku pojedynczych detektorów. Dodatkowo, aby zwiększyć skuteczność wykrywania przedmiotów niebezpiecznych i zmniejszyć obciążenie poznawcze służb ochrony lotniska, za uzasadnione należy uznać stosowanie sztucznej inteligencji w procesie analizowania sygnałów z przedmiotowych detektorów.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Badyda A. J., Zagrożenia środowiskowe ze strony transportu, Wydawnictwo Nauka, 2010 ISBN: 1231-8515.

Artykuły w czasopismach

1. Maziejuk M., Mierczyk J., Spektrometry ruchliwości jonów w zastosowaniu do wykrywania bojowych substancji toksycznych, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, nr 1/2007.

2. Magniszewski M., Nowoczesne technologie kontroli bezpieczeństwa stosowane w portach lotniczych, Politechnika Rzeszowska, <https://doi.org/10.34862/rbm.2020.1.11>.

Komunikaty Internetowe

1. Lot: w 2019 roku 10 milionów pasażerów, 114 milionów złotych zysku, <https://turystyka.rp.pl/transport/linie-lotnicze/40705-lot-w-2019-roku-10-milionow-pasazerow-114-milionow-zlotych-zysku> (dostęp 01.07.2022).
2. Pacific Southwest Airlines Flight 1771, https://planecrash.fandom.com/wiki/Pacific_Southwest_Air-lines_Flight_1771 (dostęp: 01.2021).
3. Czym się różni bagaż rejestrowany od podręcznego, <https://walizki-kabinowe.pl/znaczy-bagaz-rejestrowany-czym-rozni-sie-podrecznego> (dostęp 01.2021).
4. Przykładowy skaner wraz z przykładem generowanego obrazu, Źródło: <http://www.astrophysics.pl/przeswietlarki-bagazu-rtg/> (dostęp 01.2021).
5. Przykładowa tabela wyświeczonego koloru zależnego od liczby atomowej materiału Źródło: <http://astrophysics.pl/przeswietlarki-bagazu-rtg/> (dostęp 01.2021).
6. Przykładowe urządzenie ETD, Źródło: https://www.tsatrace.com/Itemiser®-DX-Explosive-Trace-Detector_p_72.html (dostęp 01.2021).
7. Przykładowy skaner cieczy, Źródło: <https://www.ceia.net/security/product.aspx?a=EMA%20series> (dostęp 01.2021).
8. Przykładowa bramka magnetyczna <https://zorpro.com/product/zorpro-33-walk-through-metal-detector/> (dostęp 01.2021).
9. Przykładowy skaner HHMD formy Garrett, Źródło: <https://www.adorama.com/ga1165190.html> (dostęp 01.2021).

EQUIPMENT USED FOR SAFETY CONTROL AT AIRPORTS

Abstract

Since air transport means, and above all airplanes, have repeatedly been the site of terrorist attacks, it is important to effectively detect dangerous goods that can be used for terrorist activities. For this purpose, various security systems are in place at airports. The aim of this study was to present the security systems used to control hand luggage at airports. This paper is a synthetic description of devices used at airports during baggage control, together with an overview of their principles of operation.

Keywords: airports, security control, technical security systems

Aleksander OLEJNIK*
Andrzej FRYDRCHWICZ***
Michał CIAŁKOWSKI**
Łukasz KISZKOWIAK*
Adam DZIUBIŃSKI****

BOJOWY BEZZAŁOGOWY SAMOLOT POŁA WALKI

Dotychczasowe wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych w misjach bojowych wskazuje na brak specjalizowanego latającego środka bojowego mogącego skutecznie wykonywać powierzone zadania w warunkach intensywnego działania środków obrony przeciwlotniczej przeciwnika. W niniejszej pracy zaprezentowano podstawowe założenia dotyczące projektu Bojowego Bezzałogowego Samolotu Poła Walki, w skrócie BBSPW. Przedstawiono podstawowe dane taktyczno-techniczne opracowywanego samolotu. Jednocześnie zaprezentowano wyniki prowadzonej identyfikacji charakterystyk aerodynamicznych nowoprojektowanego obiektu. Obliczenia wykonano przy użyciu metody objętości skończonych korzystając ze specjalistycznego oprogramowania. Przedstawiono model numeryczny samolotu oraz sposób prowadzenia analizy aerodynamicznej. Wyniki zaprezentowano w postaci wykresów składowych siły i momentu aerodynamicznego w funkcji kąta natarcia.

Słowa kluczowe: aerodynamika, samolot, bezzałogowy statek powietrzny, BBSPW, CFD

1. WPROWADZENIE

Bezzałogowe statki powietrzne stanowią obecnie bardzo zaawansowane technologiczne środki rozpoznania i walki. Wykorzystywane są w strukturach wszystkich rodzajów sił zbrojnych. Technologie związane z bezzałogowymi statkami powietrznymi są obecnie bardzo intensywnie rozwijane. Rozwój

* Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa.

** Politechnika Poznańska

*** Politechnika Warszawska

**** Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa, Zakład Aerodynamiki

nowoczesnych materiałów oraz ciągła miniaturyzacja elektroniki pozwala na opracowywanie obiektów zdolnych do realizacji wcześniej nieosiągalnych zadań. Przyczynia się to do rozwoju nowych bardziej skutecznych metod wykorzystania bezzałogowych statków bojowych w działaniach bojowych. Ten typ uzbrojenia może wykonywać pełne spektrum zadań bojowych, redukując przy tym ryzyko występujące podczas ich realizacji przez załogowe statki powietrzne i potencjalnie zmniejszając koszty działań operacyjnych.

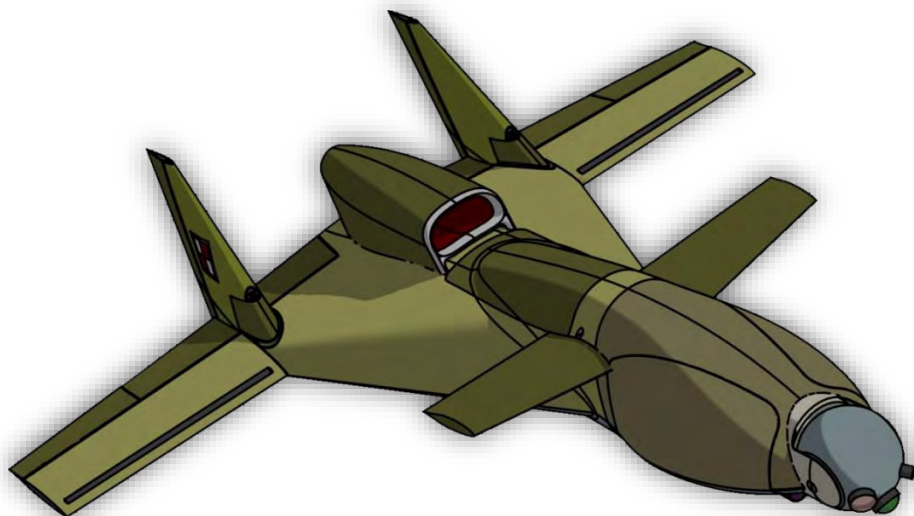
Bojowe bezzałogowe statki powietrzne można scharakteryzować przez pryzmat uzyskiwanych osiągnięć oraz zadań, jakie powinny wykonywać na współczesnym polu walki. Dotychczasowe wykorzystanie BBSP w misjach bojowych wskazuje na brak specjalizowanego latającego środka bojowego mogącego skutecznie wykonywać powierzone zadania w warunkach intensywnego działania środków obrony przeciwlotniczej przeciwnika. Obecnie eksploatowane bezzałogowe statki powietrzne nie zapewniają odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa realizowanych misji bojowych oraz zazwyczaj posiadają znaczne ograniczenia dotyczące przeniesionego uzbrojenia. Wynika to z faktu, że zadania jakie miały realizować w głównej mierze polegają na szeroko rozumianym rozpoznaniu przeciwnika z opcjonalną możliwością niszczenia wykrytych celów. Analizując ich wykorzystanie i potrzeby sił zbrojnych wielu armii wskazane jest opracowanie taniego środka bojowego posiadającego zdolność jednoczesnego niszczenia wielu celów. Ponadto mając na uwadze ograniczenie kosztów systemu opartego o bezzałogowe platformy latające wskazane jest opcjonalne przystosowanie statków powietrznych do realizacji zadań związanych z rozpoznaniem.

2. OPIS BOJOWEGO BEZZAŁOGOWEGO SAMOLOTU POLA WALKI

Bazując na wnioskach z analizy stanu techniki w dziedzinie bojowych bezzałogowych statków powietrznych oraz mając na uwadze bieżące i perspektywiczne potrzeby Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej nowoczesny Bojowy Bezzałogowy Samolot Pola Walki (BBSPW) powinien odznaczać się następującymi cechami:

- wysoka manewrowość;
- szybkie dotarcie w rejon działań;
- możliwość jednoczesnego rażenia wielu celów;
- działanie w ugrupowaniu roju;
- możliwość operowania w trybie sterowania zdalnego oraz lotu autonomicznego;
- wysoka przeżywalność na polu walki;
- niska wykrywalność;
- duża mobilność wyrzutni;

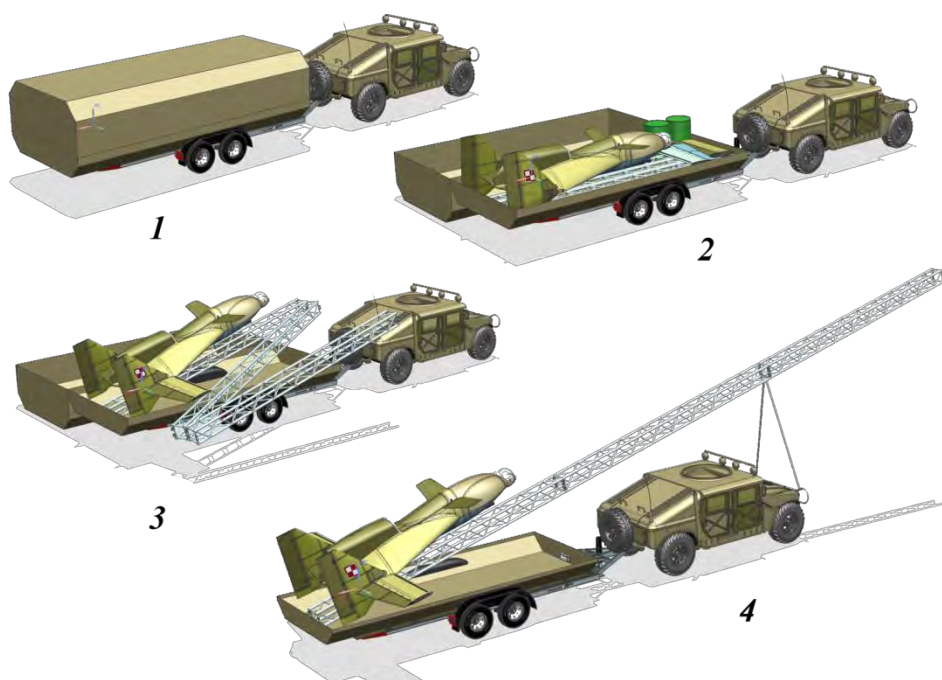
- modułowość konstrukcji;
- zastosowanie nowoczesnych materiałów;
- niska cena pozyskania zestawu.



Rys. 1. Bojowy Bezzałogowy Samolot Pola Walki – Skorpion 2

Bojowy Bezzałogowy Samolot Pola Walki – Skorpion 2, którego sylwetka została przedstawiona na rysunku nr 1, przeznaczony będzie do niszczenia broni pancernej, śmigłowców i umocnień za pomocą pocisków raketowych o dużej sile przebicia. Ponadto w razie potrzeb przewiduje się możliwość przenoszenia kierowanych bomb szybujących. Samolot startując z mobilnej wyrzutni, w małej odległości od pola walki, będzie sterowany zdalnie przez operatora lub będzie wykonywać lot autonomicznie po wcześniej ustalonym torze lotu. W wersji autonomicznej samoloty będą operować w postaci roju robotów. Wysoko manewrowy samolot bezzałogowy wyposażony będzie w jeden silnik odrzutowy oraz będzie posiadał w swoim wnętrzu automatyczny magazyn na ok. 10 pocisków raketowych. Zastosowanie silnika odrzutowego zapewni pożądane osiągi oraz pozwoli na szybkie dotarcie w rejon działań. Samolot ze złożonymi skrzydłami przewożony będzie w wozie transportowym, który będzie również stanowić wyrzutnię startową (rysunek nr 2). Po ustawieniu wyrzutni w różnych ukrytych miejscach samoloty będą startować formując w pobliżu pola walki roje robotów (rysunek nr 3). Lądowanie samolotu będzie wspomagane siatką hamującą. Przyjęty sposób startu i lądowania nie wymaga posiadania odpowiednio wcześniej przygotowanej infrastruktury lotniskowej. Ma to bezpośredni wpływ na zwiększenie możliwości wykorzystania nowoczesnego bojowego statku

powietrznego. Natomiast paliwo zgromadzone w zbiornikach paliwa powinno zapewnić mu długotrwałość lotu na poziomie 1 godziny. Jest to czas, który jest niezbędny do wykonania postawionego zadania. W tym czasie BBSPW powinny dotrzeć w rejon celu/celi, dokonać ataku (odpalić przenoszone pociski raketowe) i powrócić do rejonu bezpiecznego. Przyjęty kształt i konfiguracja aerodynamiczna samolotu powinna sprzyjać zmniejszeniu powierzchni skutecznego odbicia radarowego. Natomiast w połączeniu z wysoką manewrowością zapewni wysoką przeżywalność na polu walki w sytuacji, gdy przeciwnik stosuje wyspecjalizowane środki obrony przeciwlotniczej. Wysoka manewrowość samolotu pozwoli mu szybko zmienić położenie w przestrzeni w określonym czasie, z każdą prędkością i na wszystkich wysokościach lotu. Natomiast wysoką manewrowość warunkuje dobra sterowność, czyli wysoki stopień reagowania samolotu na wychylenie sterów. Z kolei sterowność jest uzależniona od statycznej stateczności, a więc od tendencji samolotu do powrotu do stanu wyjściowego po wytrąceniu z tego stanu. Co więcej zastosowanie elektrycznego systemu sterowania bezałogowym statkiem powietrznym pozwoli zoptymalizować funkcjonowanie układu aerodynamicznego samolotu podczas lotu pod względem doskonałości aerodynamicznej co istotnie zwiększy jego manewrowość.



Rys. 2. Sposób transportu i startu samolotu Skorpioń 2

Podstawowe dane taktyczno-techniczne Bojowego Bezzałogowego Samolotu Pola Walki – Skorpion 2:

- rozpiętość skrzydeł: 4,5 m
- długość: 4,5 m
- wysokość: 1 m
- powierzchni nośna: 6,8 m²
- maksymalna masa startowa: 550 kg
- masa własna: 400 kg
- prędkość maksymalna: 800 km/h
- prędkość przeciągnięcia: 115 km/h
- długotrwałość lotu: 1 h
- dopuszczalny współczynnik przeciążenia: 15



Rys. 3. Ugrupowanie Bojowych Bezzałogowych Samolotów Pola Walki

Uwzględniając wymagania pola walki BBSPW umożliwi niszczenie broni pancernej, śmigłowców i umocnień za pomocą pocisków raketowych o dużej sile przebicia. Ponadto po odpowiednim przystosowaniu projektowany samolot będzie mógł być wykorzystany również do prowadzenia rozpoznania i dozoru pola walki w oparciu o urządzenia optoelektroniczne oraz radar SAR.

Mając powyższe na uwadze samoloty Skorpion 2 będą zdolne do:

- rozpoznania systemów radiolokacyjnych i radioliniowych potencjalnego przeciwnika w oparciu o pasywne urządzenia rozpoznawcze;
- rozpoznania systemów łączności w oparciu o pasywne urządzenia rozpoznawcze;

- prowadzenia zakłóceń systemów radiolokacyjnych i radioliniowych potencjalnego przeciwnika w oparciu o nadajniki zakłóceń;
- prowadzenia zakłóceń systemów łączności potencjalnego przeciwnika w oparciu o nadajniki zakłóceń;
- wykrywania skażeń w oparciu o czujniki skażeń;
- laserowego podświetlania celów;
- niszczenia wykrytych celów.

3. NUMERYCZNA ANALIZA AERODYNAMICZNA BOJOWEGO BEZZAŁOGOWEGO SAMOLOTU POŁA WALKI

Numeryczną analizę aerodynamiczną wykonano przy użyciu specjalistycznego oprogramowania ANSYS Fluent bazującego na rozwiązaniu równań różniczkowych cząstkowych metodą objętości skończonych (Finite Volumes Method). Umożliwia on analizę przepływów nieściśliwych i ściśliwych, z opcjonalnym uwzględnieniem lepkości przepływu. W programie zaimplementowano wiele modeli turbulencji. Równania ruchu rozwiązywane są na siatkach niestrukturalnych (tetrahedralnych), strukturalnych i hybrydowych.

Siatki obliczeniowe samolotu wykonano przy użyciu oprogramowania ICEM CFD, wchodzącego w skład pakietu ANSYS. Program ICEM CFD jest zaawansowanym narzędziem do preprocesingu, umożliwiającym pełne przygotowanie modelu geometrycznego, czyli budowę lub import geometrii z programu CAD, jej naprawę oraz upraszczanie. Program ICEM CFD umożliwia tworzenie siatek strukturalnych oraz niestrukturalnych, o elementach tetrahedralnych, pryzmatycznych, heksagonalnych, ostrosłupowych, a także siatek hybrydowych składających się z wielu typów elementów. Jest on również wyposażony w liczne narzędzia do sprawdzania i poprawy jakości siatki. Do poprawy jakości elementów siatki służą automatyczne i manualne narzędzia, dające możliwość m.in. wygładzenia, zagęszczenia, rozrzedzenia siatki, a także w razie potrzeby przesuwania poszczególnych węzłów wewnątrz domeny.

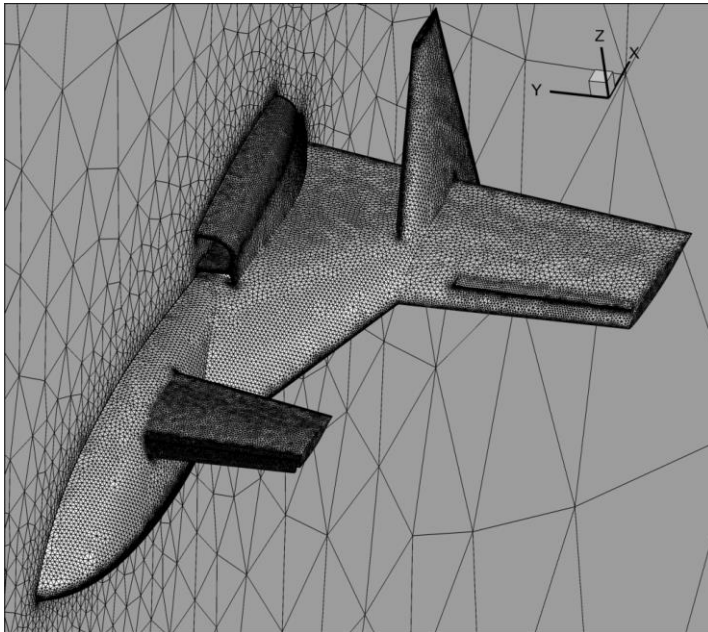
W obszarze otaczającym płatek samolotu wygenerowano siatkę niestrukturalną o gęstościach przedstawionych na rysunku nr 4. W opracowywanych modelach obliczeniowych na powierzchni płatu zastosowano warunek brzegowy WALL - ściana z warunkiem rozwoju turbulencji "standard wall function". Na tylnej ścianie domeny założono warunek PRESSURE OUTLET, a na ścianach: przedniej, górnej, dolnej i bocznej - warunek pola dalekiego przepływu: PRESSURE FAR FIELD.

Podczas wykonywania numerycznych analiz aerodynamicznych w opływie symetrycznym przyjęto następujące założenia:

- symetria pola przepływu;

- symetria geometrii;
- przepływ jest stacjonarny i ustabilizowany, czyli za płatowcem nie pojawia się ścieżka wirów Karmana ani żadna inna niestacjonarna struktura w przepływie;
- warunki lotu odpowiadają zerowej wysokości (na poziomie morza) według atmosfery wzorcowej: ciśnienie $p=101325$ Pa, temperatura $T=288.15$ °K, oraz gęstość powietrza $\rho=1.225$ kg/m³;

Przy wyznaczaniu wielkości bezwymiarowych współczynników sił i momentów aerodynamicznych, jako parametry odniesienia przyjęto powierzchnię nośną płata oraz jego średnią cięciwę aerodynamiczną. Położenie bieguna momentu aerodynamicznego znajdowało się na płaszczyźnie symetrii samolotu w punkcie odpowiadającym rzutowi punktu $\frac{1}{4}$ SCA na tą płaszczyznę.



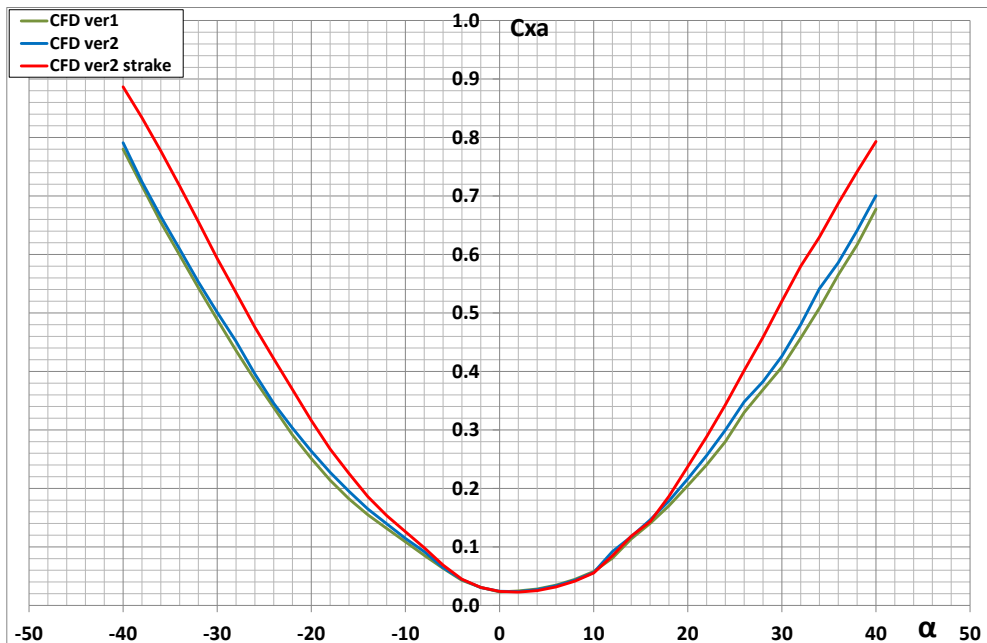
Rys. 4. Gęstość siatki obliczeniowej na powierzchni samolotu Skorpion 2

Na rysunkach nr 5 ÷ 7 przedstawiono porównanie wyników analizy numerycznej w postaci charakterystyk aerodynamicznych w funkcji kąta natarcia otrzymanych dla niżej wymienionych wersji samolotu Sokropion -2:

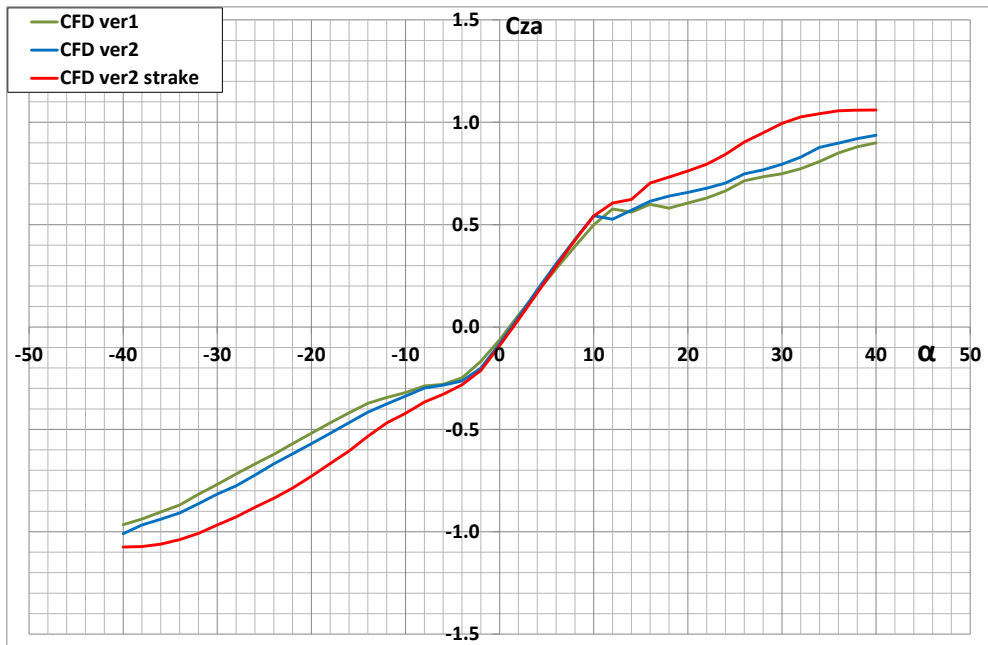
- wersja wyjściowa (przedstawiona na rys. 1) – oznaczona jako **CFD ver1**;
- wersja z usterzeniem pionowym umieszczonym na końcówkach skrzydła doczepego – oznaczona jako **CFD ver2**;

- wersja z usterzeniem pionowym umieszczonym na końcówkach skrzydła doczepnego oraz zmodyfikowanym centroplątem – oznaczona jako **CFD ver2 strakes**.

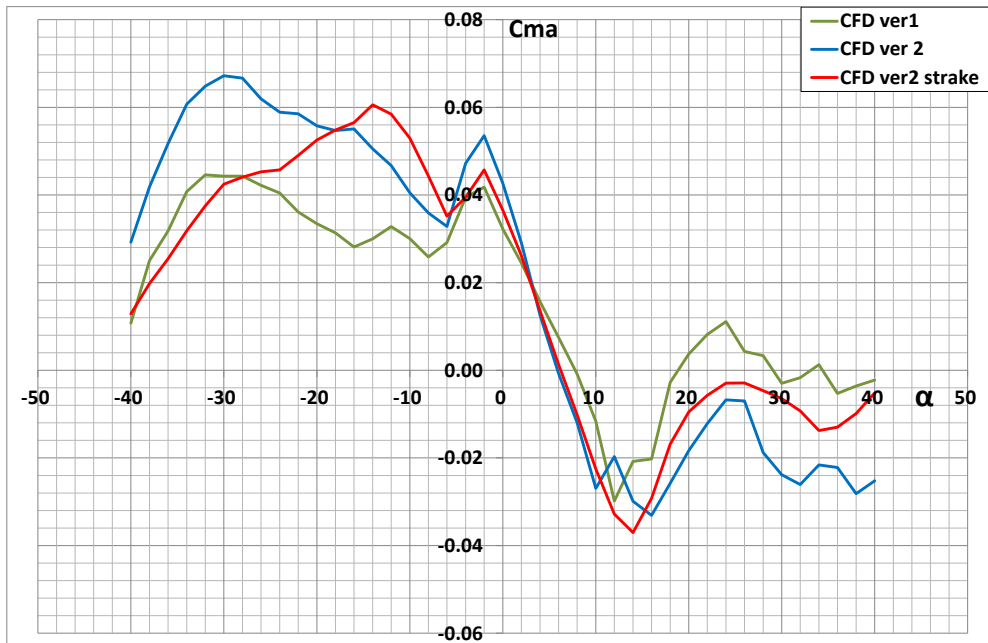
Na charakterystyce współczynnika siły oporu przedstawionej na rysunku nr 5 można zauważyć niewielki wpływ przesunięcia usterzenia pionowego na wzrost wartości tego współczynnika dla dużych kątów natarcia. Jeszcze większy wzrost wartości współczynnika siły oporu został zaobserwowany dla wersji samolotu ze zmodyfikowanym centroplątem. Modyfikacja ta polega na zastąpieniu prostoliniowej krawędzi natarcia tego skrzydła na krzywoliniową, która swoim kształtem przypomina krawędź napływów (strakes) stosowanych na bojowych samolotach o zwiększonej manewrowości. Powoduje to znaczący wzrost generowanie siły aerodynamicznej, a co za tym idzie również wartości siły oporu. Jednakże, na charakterystyce współczynnika siły nośnej, która została zaprezentowana na rysunku nr 6, można zauważyć znaczący wzrost bezwzględnej wartości tego współczynnika dla kątów natarcia mniejszych niż 4° i większych niż 10° . Ponadto, przesunięcie usterzenia pionowego na końcówki skrzydła doczepnego wpłynęło na zwiększenie stateczności samolotu (rysunek nr 7). Jednocześnie dla wersji ze zmodyfikowanym centroplątem uzyskano najmniejszy zakres kątów natarcia, dla których samolot jest stateczny statycznie względem przyjętego bieguna momentu aerodynamicznego (25% SCA).



Rys. 5. Porównanie charakterystyk aerodynamicznych współczynnika siły oporu dla kilku wersji BBSPW



Rys. 6. Porównanie charakterystyk aerodynamicznych współczynnika siły nośnej dla kilku wersji BBSPW



Rys. 7. Porównanie charakterystyk aerodynamicznych współczynnika momentu pochylającego dla kilku wersji BBSPW

4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Zaprezentowany w niniejszym artykule Bojowy Bezzałogowy Samolot Pola Walki Skorpion 2 odznacza się wysoką manewrowością, niską wykrywalnością oraz możliwością szybkiego dotarcia w rejon działań. Ponadto, dzięki zastosowaniu odpowiedniego układu aerodynamicznego oraz wyposażenia specjalnego jest zdolny do wykonania wymagających zadań bojowych w warunkach współczesnego pola walki. W połączeniu z dużą mobilnością całego zestawu (wyrzutnia, stanowisko operatora itd.) pozwoli to zapewnić dużą przeżywalność opracowywanego systemu BBSPW na polu walki.

W trakcie prowadzonych prac korzystając ze specjalistycznego oprogramowania oraz wysokowydajnego klastra obliczeniowego przeprowadzono identyfikację charakterystyk aerodynamicznych samolotu. Określono wartości sił oporu i nośnej oraz momentu pochylającego w funkcji kąta natarcia dla analizowanych wersji samolotu Skorpion 2. Uzyskane wyniki będą miały znaczący wpływ na decyzje zespołu badawczego dotyczące ostatecznego kształtu opracowywanego samolotu. Ponadto otrzymane charakterystyki aerodynamiczne mogą zostać wykorzystane na etapie wyznaczenia obciążeń działających na strukturę samolotu w trakcie lotu. Uzyskane wyniki obliczeń potwierdzają możliwość użycia analiz RANS na wczesnym etapie projektowania nowych konstrukcji lotniczych. Jednakże należy dodać, że korzystanie z metod numerycznej mechaniki płynów wymaga dużego doświadczenia i umiejętności zarówno w zakresie przygotowania modelu do obliczeń, jak również krytycznej analizy uzyskiwanych wyników. W następnym etapie prac w zakresie identyfikacji charakterystyk aerodynamicznych i lotnych obiektu przewidziane jest wykonanie badań doświadczalnych z wykorzystaniem modeli skalowanych samolotu.

Zaproponowane rozwiązanie w postaci Bojowego Bezzałogowego Samolotu Pola Walki w pełni odpowiada na potrzeby Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej w tym zakresie.

LITERATURA

1. *ANSYS. Fluent Theory Guide*, version 15.0; Ansys Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2013.
2. *ANSYS ICEM CFD Tutorial Manual*, Ansys ICEM CFD 15, November, Canonsburg, PA, USA, 2013.
3. Olejnik A., Kiszowski Ł., Dziubiński A. Aerodynamic modeling process using Reverse Engineering and Computational Fluid Dynamics; *Earth and Space 2018: Engineering for Extreme Environments*; American Society of Civil Engineers; ISBN: 9780784481899; <https://doi.org/10.1061/9780784481899.089>; USA 2018

4. Olejnik A., Kiskowskiak Ł., Dziubiński A. CFD simulation of engine nacelle cooling on pusher configuration aircraft; *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*; ISSN: 0002-2667; 2021; DOI: 10.1108/AEAT-12-2020-0290.
5. Anderson JD Jr. *Computational fluid dynamics – the basis with applications*. New York, NY: McGraw-Hill, 1995.
6. Goetzendorf-Grabowski T, Tarnowski A, Figat M, Mieloszyk J, Hernik B. Lightweight unmanned aerial vehicle for emergency medical service – Synthesis of the layout. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 235(1):5-21. doi:10.1177/0954410020910584, 2021.
7. Olejnik A., Dziubinski A., Kiskowskiak Ł., Separation safety analysis using CFD simulation and remeshing; *Aerospace Science and Technology*; Volume 106, 2020, 106190; ISSN 1270-9638; <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106190>, 2020.
8. Olejnik A., Dziubinski A., Kiskowskiak Ł. CFD simulation of empty fuel tanks separation from a trainer jet; *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*; ISSN: 0002-2667; DOI: 10.1108/AEAT-12-2019-0247, 2020.
9. Torenbeek E., *Synthesis of Subsonic Airplane Design: An Introduction To the Preliminary Design of Subsonic General Aviation and Transport Aircraft, with Emphasis on Layout, Aerodynamic Design, Propulsion and Performance*, Springer Science & Business Media, 2013.
10. Kiskowskiak, Ł. *Analiza bojowych bezzałogowych statków powietrznych pod kątem ich pozyskania dla Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej*, praca końcowa na studiach podyplomowych, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2018.
11. Kiskowskiak, Ł. *Analiza stateczności statycznej i dynamicznej samolotu z wykorzystaniem modeli skalowanych*, praca doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2019.
12. Bridel G., Goraj Z., Kiskowskiak Ł., Brevot J., Devaux J., Szczepański C., Vrchota P. Air combat training – high energy at lowest cost; *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*; ISSN: 0002-2667; 2021; DOI: 10.1108/AEAT-12-2020-0296.
13. Olejnik, A.; Kiskowskiak, Ł.; Rogólski, R.; Chmaj, G.; Radomski, M.; Majcher, M.; Omen, Ł. The Use of Unmanned Aerial Vehicles in Remote Sensing Systems. *Sensors* 2020, 20, 2003.
14. Sobieraj W. 2014. *Aerodynamika*. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna.
15. Goraj Z. *Dynamika i aerodynamika samolotów manewrowych z elementami obliczeń*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2001.

COMBAT UNMANNED BATTLEFIELD AIRPLANE

Abstract

The use of unmanned aerial vehicles in combat indicates the lack of a specialized flying warfare platform that could effectively perform the assigned tasks in conditions of intense operation of the enemy's anti-aircraft systems. In the following paper the basic design assumptions of a Combat Unmanned Battlefield Airplane, BBSPW in abbreviated form. The basic technical data of the developed airplane was shown. What is more, the results of the aerodynamic characteristics identification process of the newly designed object were presented. A numerical calculations using finite volume method implemented in specialized software were performed. An airplane numerical model and the aerodynamic analysis methodology have been presented. The results were presented in the form of diagrams showing aerodynamic force and moment components as a function of the angle of attack.

Keywords: aerodynamics, airplane, unmanned aerial vehicle, BBSPW, CFD

Aleksandra RAKOWSKA*

ELEKTROENERGETYKA I JEJ ROLA W INFRASTRUKTURZE KRYTYCZNEJ

W artykule przedstawiono zakres działania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, planowane zmiany w sektorze generacji energii elektrycznej i cele działań mających na celu zapewnienie niezawodnej pracy systemu. Omówiono także stan oraz zagrożenia dla prawidłowej pracy sieci elektroenergetycznej, skupiając się przede wszystkim na działaniu ekstremalnych warunków atmosferycznych.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo energetyczne, OZE, sieć elektroenergetyczna

1. WPROWADZENIE

Zgodnie z Narodowym Systemem Ochrony Infrastruktury należy podejmować działania zmierzające do zwiększenia ochrony i odporności narodowej infrastruktury krytycznej, jak również jej strategicznych zasobów. Wymieniając systemy infrastruktury krytycznej jako kluczowe dla bezpieczeństwa państwa i społeczeństwa na pierwszym miejscu wymienia się zaopatrzenie w energię, surowce energetyczne i paliwa. Gdyby skupić się jedynie na elektroenergetyce, to należy podkreślić, że dla zapewnienia ciągłości poprawnej pracy elektroenergetycznej infrastruktury krytycznej inne obowiązki ma operator systemu przesyłowego i inne operatorzy systemów dystrybucyjnych [Długosz 2021]. Zgodnie z ustawą – *Prawo energetyczne*, bezpieczeństwo energetyczne oznacza stan gospodarki umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, przy zachowaniu wymagań ochrony środowiska. Dotyczy to całego systemu elektroenergetycznego, obejmującego sektor wytwórczy, przesyłowy i dystrybucyjny. W przyjętej w kwietniu 2021 *Polityce energetycznej Pol-*

* Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki.

ski do 2040 r. (PEP2040) wymieniono podstawowe cele działania państwa, aby zapewnić bezpieczeństwo energetyczne naszego kraju [obwieszczenie Monitor Polski 2021]. Sformułowano następujące cele:

- optymalne wykorzystanie własnych surowców energetycznych,
- rozbudowa elektroenergetycznej infrastruktury sieciowej,
- dywersyfikacja dostaw i rozbudowa infrastruktury sieciowej gazu ziemnego, ropy naftowej i paliw ciekłych,
- rozwój rynków energii,
- wdrożenie energetyki jądrowej,
- rozwój odnawialnych źródeł energii,
- rozwój ciepłownictwa i kogeneracji,
- poprawa efektywności energetycznej.

Realizując założenia PEP2040 należy pamiętać o ochronie środowiska i wskazaniach m.in. zawartych w *Europejskim Zielonym Ładzie*. Europejski Zielony Ład to pakiet inicjatyw politycznych, którego celem jest skierowanie Unii Europejskiej na drogę transformacji ekologicznej, a ostatecznie – osiągnięcie neutralności klimatycznej Europy do 2050 r.

2. DZIAŁANIA W SEKTORZE WYTWÓRCZYM DLA ZAPEWNIENIA BEZPIECZEŃSTWA ENERGETYCZNEGO

Krajowy System Elektroenergetyczny KSE to cała infrastruktura przeznaczona do wytwarzania, przesyłu, rozdziału i magazynowania oraz użytkowania energii elektrycznej. Na KSE składa się:

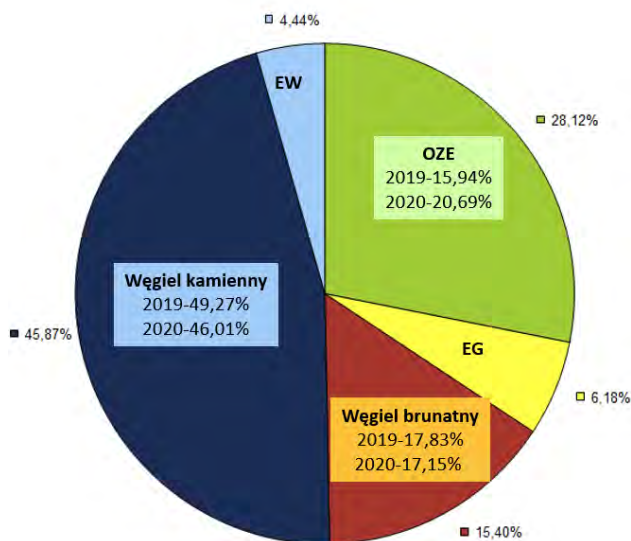
- system wytwórczy – czyli wszystkie źródła wytwarzające energię elektryczną w Polsce,
- sieć przesyłowa – składająca się z linii najwyższych napięć (NN) o napięciu 220 i 400 kV oraz stacji energetycznych NN,
- sieć dystrybucyjna – dostarczająca energię elektryczną do odbiorców za pomocą linii energetycznych o napięciu 110 kV i niższym oraz stacji energetycznych wysokiego i średniego napięcia.

Za system przesyłowy odpowiada Operator Systemu Przesyłowego (*ang. Transmission System Operator TSO*), czyli Polskie Sieci Elektroenergetyczne, z główną siedzibą w Konstancinie-Jeziorna. Natomiast za system dystrybucyjny odpowiadają Operatorzy Systemu Dystrybucyjnego OSD (*ang. Distribution System Operator DSO*). OSD to Enea Operator Sp. z o.o., Energa Operator S.A., PGE Dystrybucja S.A., Stoen Operator Sp. z o.o. i Tauron Dystrybucja S.A.

Opierając się na danych Operatora Systemu Przesyłowego można ocenić zmiany dotyczące sektora wytwórczego. Na rysunku 1 pokazano zmiany w strukturze mocy

zainstalowanej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) zgodnie ze stanem na 31.12.2021 roku. Na rysunku zaznaczono także dane dotyczące końca roku 2020 i 2019. Natomiast na rysunku 2 pokazano dynamikę wzrostu mocy zainstalowanej w KSE w latach 1960÷2021 (zachowano oznaczenie kolorami, jak na rysunku 1) [PSE 2022]. Największy udział w wytwarzaniu energii elektrycznej mają elektrownie parowe, spalające węgiel kamienny i brunatny. Optymizmem napawa zwiększający się udział odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz niewielki wzrost udziału w miksie energetycznym elektrowni gazowych (EG). Udział elektrowni wodnych (EW) w sektorze wytwarzania pozostaje na właściwie niezmiennym poziomie.

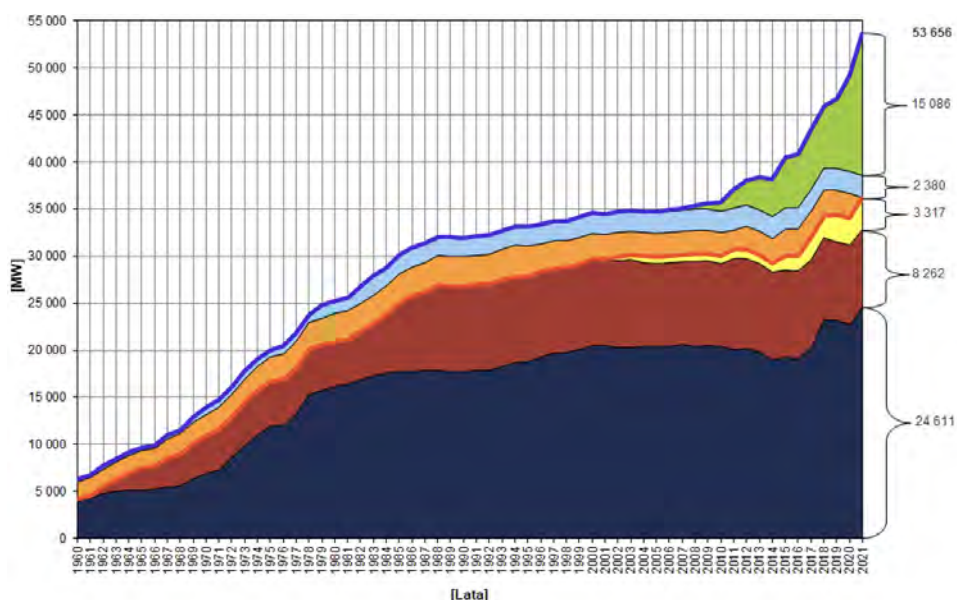
Zgodnie z różnymi raportami dotyczącymi zasobów kopalnych, stanowiących paliwo dla elektrowni, należy brać pod uwagę ich zużywanie i przewidzieć także wyczerpanie niektórych złóż [Zakrzewska i Gil-Świdorska 2018]. Konieczne jest również uwzględnianie faktu, że spalaniu węgla towarzyszy silne zanieczyszczenie środowiska, co generuje nie tylko skutki ekonomiczne, ale wpływa na zdrowie i komfort życia ludzi. Nie bez znaczenia są również zwiększające się ceny węgla nie tylko na rynku krajowym, ale także na rynkach światowych – co obserwuje się obecnie.



Rys. 1. Struktura procentowa mocy zainstalowanej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym [PSE 2021]

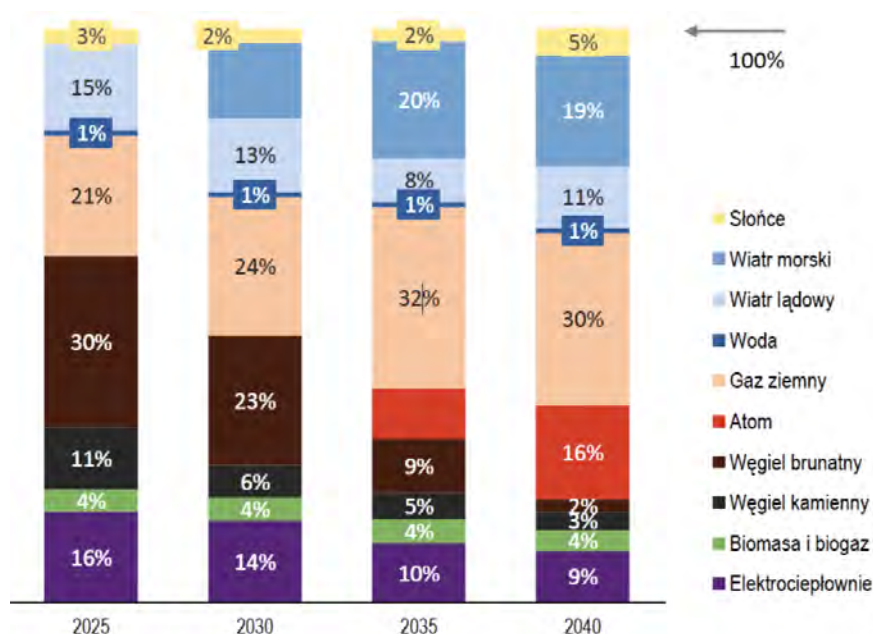
Dodatkowo, czas użytkowania wielu kotłów i turbozespołów pracujących w polskich elektrowniach opalanych węglem wskazuje, że ponad 60% z nich jest eksploatowanych już ponad 30 lat [Szczerbowski 2016]. Przyjmowane są różne scenariusze wycofywania poszczególnych jednostek wytwórczych uwzględniając tzw. “koniec życia”, który przyjmuje się jako ~50 lat eksploatacji. Gdyby przyjąć dodatkowo koniecz-

ność uwzględnienia wdrożenia konkluzji BAT (ang. *Best Available Techniques*) dotyczących standardów emisyjnych, to do roku 2035 konieczne będzie wyłączenia jednostek wytwórczych o sumarycznej mocy 20 GW – zgodnie ze scenariuszem PSE [Szczerbowski 2016]. Elektrownie węglowe i duże zakłady przemysłowe czeka więc konieczność modernizacji instalacji, dzięki którym zmniejszą one emisję zanieczyszczeń. Jest to wymóg przyjętych i ogłoszonych w roku 2017 przez Komisję Europejską konkluzji BAT. Wynika z tego, że niezbędny jest rozwój sektora wytwórczego. Zgodnie z PEP2040, zaplanowano zmniejszanie udziału źródeł wytwórczych opartych na paliwach kopalnych i zainwestowanie w odnawialne źródła energii oraz źródła niskoemisyjne.



Rys. 2. Dynamika wzrostu mocy zainstalowanej w KSE w latach 1960÷2021 [PSE 2021]

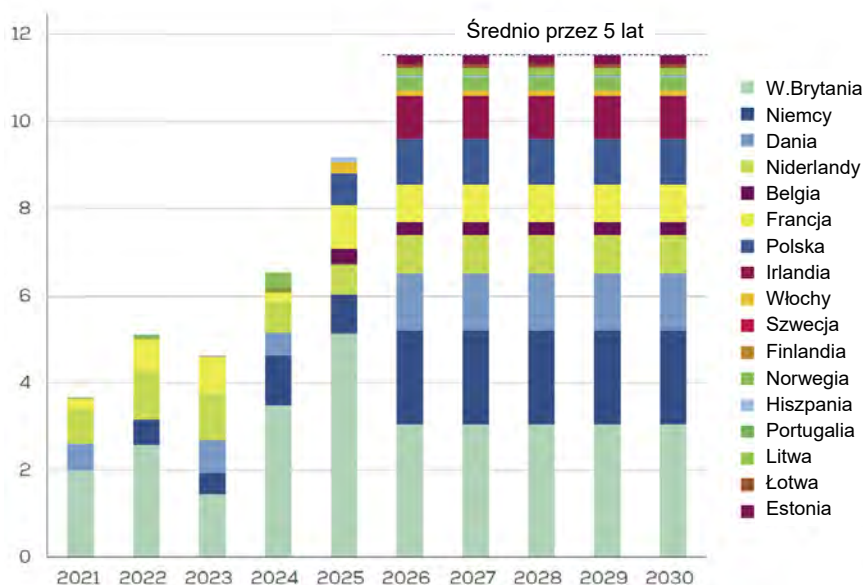
W lutym 2022 Komisja Europejska określiła kryteria dla konkretnych działań w sektorze wytwórczym, związanych z gazem i energią jądrową oraz stwierdziła, że są one zgodne z celami klimatycznymi i środowiskowymi UE i pomogą przyspieszyć przejście od stałych lub ciekłych paliw kopalnych, w tym węgla, w kierunku neutralnej dla klimatu przyszłości – czyli zaliczono te technologie wytwarzania energii elektrycznej jako niskoemisyjne. Na rysunku 3 pokazano założony procentowy udział źródeł w strukturze wytwarzania energii elektrycznej, zgodnie z *Polską polityką energetyczną do 2040* [Obwieszczenie Monitor Polski 2021].



Rys. 3. Udział źródeł w strukturze wytwarzania energii elektrycznej wg PEP2020

W PEP2040 zaplanowano w sektorze wytwórczym szerszy udział OZE, a w tym morskiej energetyki wiatrowej (offshore) i lądowej (onshore), zakładając również rozwój fotowoltaiki oraz, jako technologii niskoemisyjnej, energetyki jądrowej. W opublikowanych w marcu 2022 przez Kancelarię Rady Ministrów założeniach do aktualizacji PEP2040 przyjęto zwiększenie dywersyfikacji technologicznej i rozbudowę źródeł wytwórczych opartych o źródła krajowe. Podkreślono także, że inwestycje w sektorze energetycznym będą ukierunkowane na zapewnienie stabilności pracy systemów energetycznych z uwzględnieniem ograniczania wpływu sektora na środowisko życia człowieka [Gov 2022].

Dynamiczny rozwój wykorzystywania generacji energii elektrycznej z morskich farm wiatrowych jest imponujący. Gdy spojrzeć na dane dotyczące planów dalszego rozwoju korzystania z tej technologii, to widzi się że dzięki wykorzystaniu całego potencjału europejskiej morskiej energetyki wiatrowej coraz bardziej realne staje się zrealizowanie założeń zawartych w *Europejskim Zielonym Ładzie*. Bardzo obiecująco rysuje się rozwój morskiej energetyki wiatrowej na Morzu Bałtyckim [Rakowska 2021]. Na rysunku 4 pokazano planowany rozwój morskiej energetyki wiatrowej w Europie, zgodnie z raportem [Offshore wind in Europe], na którym znalazły się także dane dotyczące polskich inwestycji offshore.



Rys. 4. Planowany rozwój budowy nowych morskich farm wiatrowych obrazowany rocznym przyrostem mocy zainstalowanej w MFW wyrażonej w [GW]

Jak stwierdzono w [Drożdż i Mróz-Malik 2020], morska energetyka wiatrowa jest stosunkowo nowym sektorem gospodarki o ogromnym potencjale. A jej główną zaletą jest przewidywalna produkcja i wysoki współczynnik wykorzystania mocy, szacowany na poziomie 50% (w przyszłości nawet 60%), co czyni ją najbardziej efektywnym źródłem energii spośród wszystkich technologii odnawialnych. Uważa się, że Polska posiada największy potencjał rozwoju morskiej energetyki wiatrowej w regionie Morza Bałtyckiego, co odzwierciedlają plany inwestorów przygotowujących się do budowy MFW w polskich obszarach morskich. Planowana w PEP2040 energetyka wiatrowa na morzu ma osiągnąć moc zainstalowaną ok. 5,9 GW w roku 2030 i ok. 11 GW w roku 2040.

8 lutego 2021 roku weszły w życie przepisy ustawy o promowaniu wytwarzania energii elektrycznej w morskich farmach wiatrowych. Dokument ten jest podstawą wsparcia rozwoju wiatraków na polskich wodach Morza Bałtyckiego. W pierwszej fazie systemu wsparcia, przyznanego w drodze decyzji administracyjnej wydanej przez Prezesa URE, udzielono je morskim farmom wiatrowym o łącznej mocy zainstalowanej około 5,9 GW. W tabeli 1 zestawiono nazwy i planowaną moc zainstalowaną tych MFW, zlokalizowanych w polskiej *Wylącznej Strefy Ekonomicznej* [internet parkiet]. Polskie Sieci Elektroenergetyczne dotychczas wydały warunki przyłączenia lub podpisały umowy dla projektów wymienionych w Tabeli 1 oraz planowanych do realizacji w terminie późniejszym – dla morskich farm wiatrowych (MFW) o łącznej mocy 8,4 GW [internet wysokie napięcie].

Tabela 1

Planowana moc zainstalowana w MFW do 2030 r. – dane URE

Projekt	Podmiot	Moc [MW]
MFW Bałtyk III/MFW Bałtyk II	Equinor i Polenergia	1440
Baltica 2/Baltica 3	PGE/Orsted	2545
Baltic Power	Orlen/Northland Power	1200
FEW Baltic II	RWE	350
B Wind/C Wind	OW Offshore (EDPR/Engie)	399

Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej przeprowadziło sondę mającą na celu zbadanie opinii społecznej na temat rozwoju morskiej energetyki wiatrowej w naszym kraju. Na pytanie: „Czy uważasz, że rozwój morskich farm wiatrowych może wpłynąć pozytywnie na walkę ze zmianami klimatu?” – pozytywnie odpowiedziało 81% respondentów.

Na potwierdzenie jak dynamicznie rozwija się morska energetyka wiatrowa – warto wspomnieć o należącej do Danii pierwszej morskiej farmie wiatrowej. Farma ta składała się z 11 elektrowni wiatrowych o jednostkowej mocy 0,45 MW, a jej rozebranie nastąpiło po 25 latach eksploatacji. Zdecydowano się na jej zlikwidowanie, bo przy tak dynamicznym rozwoju morskich turbin dalsza jej eksploatacja stała się nieopłacalna, ponieważ instalowane obecnie turbiny są już o mocy 13 MW np. w jednej z większych MFW Dogger Bank (należącej do Wielkiej Brytanii o mocy 3,6 GW). Farma ta ma być ukończona w 2026 roku i jest budowana w trzech etapach jako Dogger A, B i C – każda część farmy o mocy 1,2 GW. Wyobraźnię pobudza informacja, że dla turbin 13 MW jeden obrót ich 220-metrowych wirników wytworzy wystarczającą ilość energii elektrycznej, aby zasilac przeciętny dom w Wielkiej Brytanii przez dwa dni. Planowane już jest także dostarczanie morskich turbin wiatrowych o mocy 14 MW [Rakowska 2021]. W następnych latach można spodziewać się skonstruowania turbin, często nazywanych również „wiatrakami morskimi”, o jeszcze większych zdolnościach wytwórczych. Ale już teraz zdjęcie pokazujące gondolę turbiny o mocy 12 MW (Rys. 5) budzi podziw dla osób, które na morzu budują kolejne elektrownie wiatrowe, o coraz większych mocach wytwórczych [Nowicki 2019 i 2021].



Rys. 5. Grupa stojących pracowników obok ukończonej gondoli dla turbiny Heliade-X o mocy 12 MW produkcji firmy GE Renewable Energy [Nowicki 2019]

Z lądową energetyką wiatrową wiąże się także pewne nadzieje na wzmocnienie KSE. Niestety zapisy Ustawy z 2016 roku (tzw. ustawa odległościowa) mówiące, że elektrownia wiatrowa nie może być zbudowana w odległości mniejszej niż dziesięciokrotność wysokości turbiny z uniesionymi łopatkami (10H) od zabudowań mieszkalnych oraz form ochrony przyrody i lasów – praktycznie zahamowały rozwój energetyki onshore w naszym kraju. Od dłuższego czasu trwają prace nad modyfikacją treści tej ustawy. Projekt jej nowelizacji zakłada m.in. uelastycznienie zasady odległościowej, zakładającej minimalną odległość elektrowni od budynku, określając, kiedy ta odległość może być zmniejszona, ale wprowadza także bezwzględną odległość minimalną równą 500 metrów. Mimo tej “bariery” i tak udało się uruchomić wiele farm onshore – można wymienić kilka obecnie największych wiatrowych farm lądowych. Są to: FW Potęgowo o mocy 219 MW (oddana do użytku w grudniu 2020 z 81. turbinami o mocy 2,5 i 2,75 MW), FW Margonin o mocy 120 MW (oddana do eksploatacji w 2009 z 60. wiatrakami), FE Banie o mocy 106 MW (uruchomiona w 2016, z 53. turbinami), FW Maraszewo o mocy 100 MW (uruchomiona w 2013 z 50. turbinami) oraz FW Lotnisko z mocą 94,5 MW (oddana do eksploatacji w 2015 z 30. turbinami o mocy 3,15). Jako ciekawostkę dotyczącą ostatniej z wymienionych wśród pięciu największych obecnie farm – FW Lotnisko z systemem energetycznym połączono dwutorową linią kablową 110 kV – o rekordowej długości linii kablowej na tym poziomie napięcia wynoszącej 38 km.

Wśród źródeł OZE należy również podkreślić obserwowany w ostatnich latach wyjątkowo dynamiczny rozwój fotowoltaiki. Dotyczy to nie tylko większych i mniejszych instalacji na różnych obiektach budowlanych, ale także farm fotowoltaicznych. Eksploatowane obecnie największe farmy fotowoltaiczne uruchomione

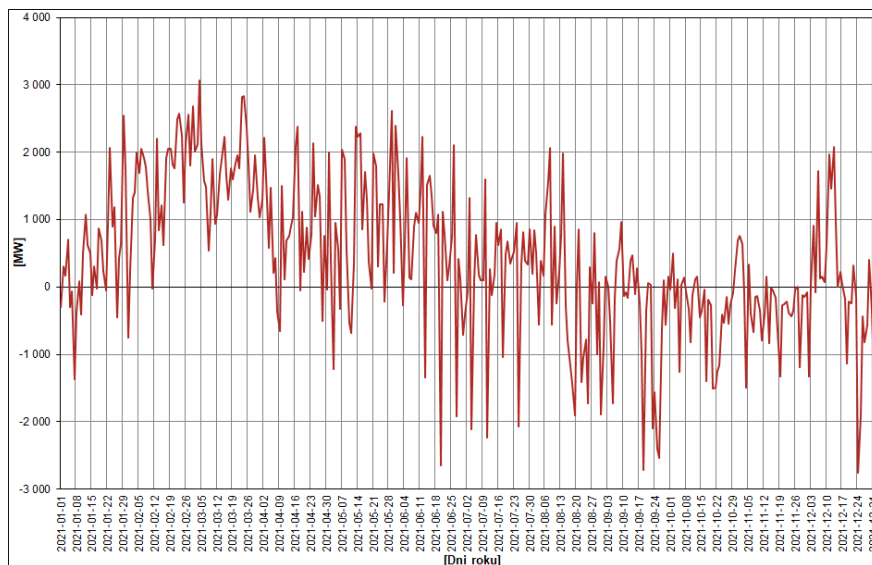
w roku 2021 to: Brudzew o mocy 70 MW, Witnica o mocy 64,6 MW, Postomino o mocy 29,96 MW i Borki Wielbarskie z mocą 8 MW.

Jak silny wpływ na bezpieczeństwo energetyczne Polski mageneracja ze źródeł odnawialnych wskazują dane dotyczące generacji energii elektrycznej w ostatnich miesiącach. Przykładowo w poniedziałek 28 marca 2022 odnawialne źródła energii (OZE) w Polsce dostarczyły do systemu 10 GW mocy, pokrywając blisko połowę zapotrzebowania całego kraju na energię elektryczną w tym okresie. W tym dniu mieliśmy w Polsce dość rzadką pogodę – równocześnie mocno wiało i świeciło słońce. Niemal bezchmurne niebo w połączeniu z coraz wyżej operującym wiosennym słońcem i wiejącym z prędkością 25-30 km/h wiatrem na Pomorzu sprawiły, że farmy wiatrowe i fotowoltaiczne „prześcigały się” w ciągu dnia w osiągnięciach, dostarczając do systemu porównywalne wielkości – po 4-5 GW każde. Kolejne dni przynoszą informacje o kolejnych rekordach wytworzonej energii elektrycznej ze źródeł OZE (np. 7.04.2022 w godz. 12.00-13.00 uzyskano 6,69 GWh energii elektrycznej z lądowych farm wiatrowych, a z fotowoltaiki 3,93 GWh).

Z kolei plany dotyczące energetyki jądrowej zakładają uruchomienie dwóch elektrowni. Budowa pierwszej ma się rozpocząć w 2026 r., a drugiej w 2032 r. W każdej zaplanowano uruchomienie 3 reaktorów o mocy 1-1,6 GW. W PEP2040 założono, że inwestycja będzie zakończona w 2043 r. Niedawno ogłoszono, że nadmorska gmina Choczewo została wybrana jako preferowane miejsce, w którym powstanie pierwsza w Polsce elektrownia jądrowa. Lokalizację nazwaną „Lubiatowo-Kopalino” wskazano na podstawie prowadzonych od 2017 roku bardzo szczegółowych badań środowiskowych i lokalizacyjnych, które wykazały, że spełnia ona wszystkie wymagania środowiskowe – stawiane tego typu obiektom i jest bezpieczna dla mieszkańców.

Interesujące jest zwrócenie uwagi również na małe modułowe reaktory jądrowe SMR (ang. *Small Modular Reactors*). Podpisano już pierwsze porozumienia na dostarczenie do Polski tego typu reaktorów i, jak donosi Rzeczpospolita z 14.02.2022, pierwszy taki reaktor zostanie uruchomiony w 2029 r. dla KGHM, a następne jednostki SMR są planowane do uruchomienia także przez inne podmioty gospodarcze.

Należy także pamiętać, że niezawodną pracą Krajowego Systemu Elektroenergetycznego wspomagają także połączenia transgraniczne (Rys. 6). Istniejące połączenia z systemami przesyłowymi sąsiadnych państw wzmocnione będą drugą morską linią kablową Harmony Link (po pierwszej morskiej linii kablowej SwePol Link łączącej Polskę i Szwecję oddanej do eksploatacji w 2000 r.), która będzie łączyć Polskę i Litwę. Inwestycja ta jest współfinansowana przez Unię Europejską i ma być zakończona w 2026 roku.



Rys. 6. Saldo wymiany mocy z zagranicą w dobowym szczycie krajowego zapotrzebowania na moc w poszczególnych dniach 2021 roku [PSE raport]

3. LINIE PRZESYŁOWE I DYSTRYBUCYJNE A NIEZAWODOŚĆ ZASILANIA W ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ

Temat sieci elektroenergetycznych – przesyłowych i dystrybucyjnych energii elektrycznej w ostatnich kwartałach coraz częściej pojawia się w przestrzeni publicznej. Jest ku temu kilka powodów, które sprowadzają się do jednego mianownika – sieci te stają się infrastrukturą krytyczną dla powodzenia polskiej transformacji energetycznej. Ostatnie wydarzenia światowe zmuszają do postawienia pytania o bezpieczeństwo infrastruktury elektroenergetycznej w odniesieniu do zagrożeń terroryzmem, wojną, atakami cybernetycznymi czy klęskami żywiołowymi. Ze względu na tak obszerny zakres problemów – w artykule skupiono się jedynie na działaniu klęsk żywiołowych oraz ekstremalnych warunków atmosferycznych na system elektroenergetyczny, a właściwie głównie na linie elektroenergetyczne.

Awarie systemowe mogą zostać wywołane wieloma czynnikami, które można podzielić na:

- ekstremalne warunki atmosferyczne (wiatr, oblodzenie, temperatura),
- klęski żywiołowe (powodzie, trzęsienia ziemi, huragany, tornada),
- przeciążenia linii przesyłowych i stacji systemowych,
- awarie techniczne w obwodach pierwotnych i w obwodach wtórnych,
- błędne działania ludzkie na różnych poziomach,

- akty wandalizmu lub sabotażu,
- awarie wywołane infrastrukturą otaczającą linie i urządzenia elektroenergetyczne.

Wymienione czynniki, poza spowodowaniem przerw w zasilaniu energią elektryczną, mogą doprowadzić do niestabilności pracy systemu lub spowodować znaczne odchylenia od norm wartości częstotliwości i napięcia – co także może spowodować brak zasilania na jakimś obszarze.

Linie napowietrzne, niezależnie od strefy klimatycznej są przede wszystkim narażone na oddziaływanie niekorzystnych czynników atmosferycznych oraz czynników związanych z szeroko pojętym otoczeniem. Jeden z ostatnich przykładów działania ekstremalnych warunków atmosferycznych na sieć elektroenergetyczną – to działanie przez kilka godzin orkanu Eunice, który w lutym 2022 na znacznym obszarze spowodował rozległe zniszczenia, głównie w środkowej Polsce. Efektem wichury były połamane słupy energetyczne oraz drzewa na liniach energetycznych co spowodowało braki zasilania u tysięcy odbiorców. Był to bardzo trudny czas dla operatorów energetycznych – ekipy elektromonterów przy usuwaniu awarii intensywnie pracowały w bardzo trudnych warunkach i przy dużym wietrze. W wielu miejscach drogi dojazdowe do zniszczonej infrastruktury elektroenergetycznej zostały zatarasowane przez przewrócone drzewa. Dodatkowo ulewne deszcze utrudniły z kolei, w wielu przypadkach, dojazd ciężkim sprzętem naprawczym na tereny, gdzie znajdowała się zniszczona infrastruktura elektroenergetyczna. Na obszarze północno-zachodniej Polski w kulminacyjnym momencie prądu nie miało około 600 tys. odbiorców Enei Operator. Bez napięcia było 45 Głównych Punktów Zasilających i ponad 15 tys. stacji elektroenergetycznych SN/nn. Uszkodzonych zostało 697 linii średniego napięcia oraz 75 linii wysokiego napięcia 110 kV (Rys.7 i Rys. 8). Problemy z dostawami energii elektrycznej dotknęły prawie cztery tysiące miejscowości. Z kolei na terenie Energi-Operator w szczytowym momencie nasilenia awarii pozbawionych napięcia było blisko 350 tys. odbiorców. Łącznie we wszystkich oddziałach spółki awarie dotknęły 70 linii elektroenergetycznych WN i 588 linii SN. Bez napięcia pozostawało 50 stacji WN/SN i blisko 13 tys. stacji SN/nn. Skutki działania wichury zanotowano także na obszarze działania innych Operatorów Systemu Dystrybucyjnego [Energia El. 2022].



Rys. 7. Skutki wichury i ulewnego deszczu – połamane słupy linii SN [Energia El. 2022]

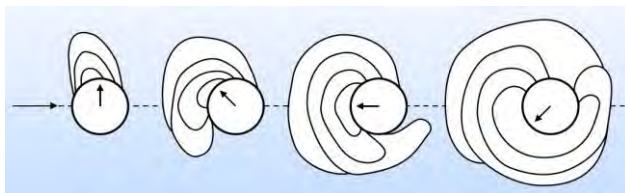


Rys. 8. Uszkodzony słup linii 110 kV na terenie działania firmy Enea Operator w północno-zachodniej Polsce (fot. media.enea.pl)

Coraz liczniej występujące anomalie pogodowe mogą się nasilać w najbliższych latach i są wynikiem zmian klimatycznych oraz pojawiającymi się lokalnymi anomaliami pogodowymi. Doświadczenia eksploatacyjne wykazały, że szczególnie warunki zimowe powodują najczęściej rozległych awarii sieci. Najpoważniejszym problemem w projektowaniu i budowie linii napowietrznych jest precyzyjne określenie dodatkowych obciążeń linii wywołanych osadem lodowym (poprzednio nazywanym sadzią) osadzającym się na przewodach i konstrukcjach wsporczych.

Powstawanie osadu lodowego jest wynikiem dwóch procesów: oblodzenia powstającego w chmurach i rosznieniu oraz wydzielaniem się lodu na elementach linii. Pierwszy proces powoduje opady zlodowaciałego lodu (gradu), opady mokrego śniegu lub opady suchego śniegu. Połączenie opadów z innymi czynnikami klimatycznymi (położenie geograficzne, wilgotność, wiatr) prowadzi do powstawania rosznienia i w konsekwencji powstawania osadu lodowego na różnych elementach. Tworzący się na przewodach linii napowietrznych osad lodowy lub śniegowy może mieć bardzo zróżnicowaną gęstość, zależną od warunków jego powstawania. Osad lodowy może być w postaci lodu zeszkolego, twardego lub miękkiego osadu lodowego, mokrego lub suchego śniegu lub szronu. W zależności w jakiej jest postaci, jego masa wyrażona w $[\text{kg}/\text{m}^3]$ może wahać się od 700-900 do poniżej 100.

Zjawisko powstawania osadu na przewodach od strony teoretycznej badano w laboratoriach w Japonii w wyniku czego stwierdzono, że w momencie osadzania się kolejnych warstw śniegu, zlodowaciałego śniegu lub osadu śniegowo-lodowego – przewód obraca się, co prowadzi do powstania dość równomiernej powłoki lodowo-śniegowej na powierzchni całego przewodu. Na rysunku 9 pokazano tworzenie się osadu z suchego śniegu [Sakamoto 2000].



Rys. 9. Fazy przyrastania suchego śniegu na cienkich przewodach

Koniecznym jest wspomnieć o dwóch rozległych awariach sieci elektroenergetycznej w Polsce w roku 2008 i 2010, spowodowanych osadem lodowym. Obie te awarie nazwano black-out'em, ponieważ ich skutki objęły znaczny obszar, a przywrócenie zasilania do wszystkich odbiorców trwało kilkadziesiąt godzin w pierwszym przypadku, a kilka dni w drugim przypadku. Jako pierwszą należy wspomnieć awarię w Szczecinie i okolicach w kwietniu 2008, której ocenę przytoczono w komunikacie ogłoszonym po usunięciu skutków awarii „...w sprawie braku zasilania na terenie aglomeracji szczecińskiej PSE-Operator S.A. informuje, że w nocy z dnia 7 na 8 kwietnia 2008 roku w okresie trwania katastrofalnych warunków atmosferycznych (intensywne opady mokrego śniegu oraz silny wiatr), w najbliższym rejonie aglomeracji szczecińskiej, doszło do trwałego wyłączenia kilkunastu linii energetycznych najwyższych i wysokich napięć, w tym dwóch linii 220 kV i 13 linii 110 kV” [Rakowska, Grzybowski 2008]. Skutki uszkodzenia infrastruktury energetycznej spowodowały zamknięcie sklepów, stacji benzynowych, uczelni, szkół, wielu urzędów, brak ciepłej wody i ogrzewania, nie działał Internet – więc nie można było robić operacji bankowych, zatrzymanie produkcji w zakładach przemysłowych, brak wody w mniejszych miejscowościach (Straż Pożarna dowoziła wodę w cysternach) itd. Skutki szczecińskiego black-out'u zostały szczegółowo opisane w [Kochanek 2020]. W Szczecinie przywrócono zasilanie po około 13 godzinach, a w niektórych mniejszych miejscowościach dopiero po 30 godzinach. Na rysunku 10 pokazano połamane słupy wysokiego napięcia w okolicach Szczecina oraz jak w następnym dniu po uszkodzeniu sieci roztopy utrudniały pracownikom energetyki dojazd ze sprzętem do uszkodzonych słupów.



Rys. 10. Złamany słup 110 kV oraz błoto utrudniające wykonanie napraw (fot.R.Rataj 8.04.)

Druga, na terenie Małopolski, rozległa awaria sieci napowietrznej wystąpiła w styczniu 2010 roku, w której uszkodzone zostały 4 linie 220 kV, 31 linii 110 kV oraz 148 linii SN, co spowodowało przerwę w zasilaniu energią elektryczną około 112 tysięcy odbiorców [Dymek, Jastrzębska 2013]. Obrazy uszkodzeń sieci zostały przedstawione w prezentacji autorstwa p. Marka Rogóza z Pogotowia Energetycznego Skała z Woli Kalinowkiej, którą otrzymali po usunięciu skutków black-out'u chyba wszyscy energetycy zajmujący się eksploatacją sieci elektroenergetycznych w całym kraju (Rys. 11).



Rys. 11. Zerwane przewody linii 15 kV z widoczną warstwą osadu lodowego (fot. Marek Rogóż)

Jak wspomniano wcześniej, szczególnie linie napowietrzne narażone są na uszkodzenia pod wpływem działania ekstremalnych warunków atmosferycznych. Zgodnie z raportem PTPiREE, na koniec 2021 roku – PSE oraz Spółki Dystrybucyjne eksploatowały linie napowietrzne o długości (w przeliczeniu na jeden tor): 15 774 km linii najwyższych napięć NN, 33 525 km linii wysokich napięć WN, 216 942 km linii średniego napięcia SN oraz 279 596 km linii niskiego napięcia nn (bez przyłączy). Przyłącza nn od wielu już lat wykonywane są przewodami izolowanymi i razem stanowiły na koniec 2021 – linie o długości 171 721 km [PTPiREE, 2022]. Niestety, zgodnie z wynikami analiz przeprowadzonych w ramach realizacji projektu finansowanego przez Narodowego Centrum Nauki, zgodnie ze stanem na rok 2015 – zaledwie 20% linii napowietrznych 400 kV i niespełna 1% linii 220 kV miało mniej niż 10 lat; powyżej 25 lat było 58% linii 400 kV oraz 11% linii 220 kV; 10% linii 400 kV i aż 74% linii 220 kV przekraczało wiek 35 lat [Zakrzewska, Gil-Świdarska 2018]. Natomiast wiek sieci dystrybucyjnej oceniano według stanu na koniec 2013. W systemie dystrybucyjnym, 35,4% linii napowietrznych WN było starszych niż 40 lat, a 38,4% linii eksploatowanych było przez okres w przedziale 25-40 lat. Po-

dobne dane dotyczyły linii napowietrznych SN – było 30% linii pracujących powyżej 40 lat i 43,5% w „wieku” 25-40 lat. Niestety także linie kablowe SN to 13,9% – praca powyżej 40 lat oraz 26,2% w przedziale 25-40 lat [Tomczykowski 2015]. Ocena struktury wiekowej sieci wskazuje na konieczność przeprowadzenia modernizacji i jej rozbudowę, nie tylko dla poprawy wskaźników niezawodności pracy sieci, ale także ze względu na konieczność przyłączania nowych odbiorów i przede wszystkim nowych źródeł OZE.

Wszyscy OSD w swoich strategiach zapisali zwiększanie stopnia skablowania sieci, szczególnie sieci SN oraz szersze stosowanie przewodów izolowanych w liniach napowietrznych, co wyraźnie poprawi wskaźniki pozwalające ocenić niezawodność pracy danej sieci. W krajach, w których jest wysoki procent udziału sieci kablowej w sieci SN – rejestrowane są bardzo niskie wskaźniki typu SAIDI. Dowodem są doświadczenia eksploatacyjne w Niderlandach, gdzie jest najwyższy w Europie wskaźnik skablowania sieci SN i najniższy wskaźnik SAIDI. A SAIDI (ang. *System Average Interruption Duration Index*) to wskaźnik przeciętnego trwania przerwy długiej i bardzo długiej, wyrażony w minutach na odbiorcę na rok, stanowiący sumę iloczynów czasu jej trwania i liczby odbiorców narażonych na skutki tej przerwy w ciągu roku, podzieloną przez łączną liczbę obsługiwanych odbiorców przez danego operatora. Jak napisano w PEP2040 – udział linii kablowych w liniach SN w Polsce (w 2017 r. ok. 26%) jest jednym z najniższych w Europie, a ponad 41 tys. km linii napowietrznych SN znajduje się na terenach leśnych i zadrzewionych, gdzie skablowanie ma szczególne znaczenie dla ograniczenia przyczyn i skutków awarii sieci. W tabeli 2 zestawiono dane dotyczące sieci kablowej należącej do PSE i 5 najważniejszych operatorów systemów dystrybucyjnych: Enea Operator, Energa Operator, PGE Dystrybucja, Tauron Dystrybucja i Stoen Operator. Niestety dane statystyczne nie obejmują długości linii kablowych eksploatowanych przez PKP Energetyka ani linii konsumenckich należących do różnych zakładów przemysłowych lub właścicieli np. farm wiatrowych i fotowoltaicznych.

Tabela 2

Długość linii kablowych wg raportów PTPiREE [PTPiREE 2022]

Linie	Długość linii kablowych [km]						Suma [km]
	PSE	Enea Operator	Energa Operator	PGE Dystrybucja	Stoen Operator	Tauron Dystrybucja	
2018 NN	130						130
WN		31	50	79	144	139	443
SN		12 326	13 595	21 953	7 545	24 650	80 069
2019 NN	130				1		131
WN		35	51	93	155	145	479
SN		12 602	14 202	23 961	7 617	25 205	83 587
2020 NN	130				1		131
WN	3	66	61	93	155	180	558
SN		12 955	14 832	25 192	7 692	25 738	86 419
2021 NN	130				1		131
WN	3	69	67	111	169	205	624
SN		13 508	15 364	25 811	7 790	26 220	88 693

4. PODSUMOWANIE

Dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego konieczny jest rozwój sektora generacji energii elektrycznej poprzez modernizację istniejących i budowę nowych źródeł wytwórczych, a w tym szczególnie należy inwestować w odnawialne źródła energii, dążąc do tego, aby energia z OZE stanowiła jak największy procent w wytwarzanej strukturze mocy zainstalowanej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym. Konieczne jest wspieranie budowy morskich farm wiatrowych i wykorzystanie energii wiatru budując również farmy onshore oraz wdrożenie energetyki jądrowej – jako technologii niskoemisyjnej. Należy wspierać także rozwój fotowoltaiki, a szczególnie współpracującej z magazynami energii, z tzw. magazynami prosumenckimi, co zmniejszy zaburzenia pracy sieci dystrybucyjnej w przypadku nadmiaru energii wytwarzanej przez prosumentów w danym momencie. Należy także zwrócić uwagę, że perspektywicznie szczególną rolę w magazynowaniu energii będzie pełnił wodór, zwłaszcza ten pochodzący z OZE, gdy powstanie nadmiarowa generacja z tych źródeł. W niedalekiej przyszłości wodór również wykorzystywany będzie w transporcie publicznym i w dużych jednostkach transportowych, co przyczyni się do zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska.

Konieczna jest rozbudowa sieci elektroenergetycznej na wszystkich poziomach napięć. Wszyscy operatorzy sieci dystrybucyjnej w swoich strategiach wpisali zwiększanie stopnia skablowania sieci SN i nn oraz szersze stosowanie przewodów izolowanych w liniach napowietrznych, co wyraźnie poprawi niezawodność pracy sieci elektroenergetycznej. Wiadomo jednak, że nie wszystkie linie będą budowane jako linie kablowe – linie wysokich i najwyższych napięć o znacznych długościach i tak w większości będą liniami napowietrznymi. Można jednak stosować np. konstrukcje wsporcze o zwiększonych parametrach mechanicznych (np. rurowe słupy stalowe w miejsce słupów kratownicowych w liniach WN i NN). Na rysunku 12 pokazano stalowy słup dla linii wielotorowej na napięciu 400 kV i 110 kV [internet kromiss]. Niestety wiadomo, że uzyskanie akceptacji społecznej na budowę linii napowietrznej staje się coraz trudniejsze. Może warto skorzystać z przykładu EdF-u (francuskiego operatora systemu elektroenergetycznego) i nawiązać współpracę z artystami, aby zaprojektować ciekawe konstrukcje wsporcze/słupy dla linii napowietrznych – lub postąpić jak Szwajcarzy i w parku sportu postawić słupy w kształcie rakiet tenisowych (Rys.12) [Rakowska 2015]. Może warto także skorzystać z przykładu National Grid, operatora sieci w Wielkiej Brytanii, który zorganizował ankietę w Internecie, proponując kilka przykładów konstrukcji słupów do linii napowietrznej na napięciu 400 kV i tą drogą, właściwie jednogłośnie, wybrano bardzo lekki słup kompozytowy w kształcie litery T. W linii tej zaprojektowano także wykorzystanie izolatorów kompozytowych. Inne rozwiązanie zastosowano w Niderlandach, gdzie wymieniono słupy istniejącej linii 150 kV – wstawiając w to miejsce lekkie, wyższe słupy kompozytowe z zastosowaniem izolatorów kompozytowych w miejsce standardowych poprzeczników i otrzymano linię na napięciu 380 kV.



Rys. 12. Słup stalowy w linii 1x400 kV + 2x110 kV oraz artystyczne propozycje konstrukcji wsporczych/słupów do linii napowietrznych

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. Zakrzewska S., Gil-Świdorska A., 2018, Energetyczna infrastruktura krytyczna w Polsce – perspektywy i zagrożenia, Rynek Energii, Nr 5(138), s. 55-64.
2. Szczerbowski R., 2016, Prognoza rozwoju polskiego sektora wytwórczego do 2050 roku – scenariusz węglowy, Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal PAN, Volume 23, Issue 1, s. 5-17.
3. Drożdż W., Mróz-Malik O.J., 2020, Challenges for the Polish energy policy in the field of offshore wind energy development, Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal PAN, Volume 19, Issue 1, s. 5-18.
4. Nowicki J., 2021, Elektrownie wiatrowe na morzu – rozwiązania techniczne, Energetyka, nr 8, s.555-575.
5. Rakowska A., 2021, Morskie farmy wiatrowe a Europejski Zielony Ład, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 9, s.3-9.
6. Energetycy w walce z żywiołem, 2022, Energia Elektryczna, Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, oprac. Biuro PTPiREE, nr 2, s.1,8-9.
7. Sakamoto Y., 2000, Snow accretion on overhead wires, Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 358, No. 1776.
8. Kochanek E., Elektroenergetyczna infrastruktura krytyczna w województwie zachodniopomorskim – 10 lat po blackoucie, 2020, Przegląd Zachodniopomorski Rocznik XXXV (LXIV), Zeszyt 3 s.117-132.
9. Tomczykowski J., Sieci energetyczne pięciu największych operatorów, 2015, PTPiREE Energia Elektryczna, nr 5, s.23-25.
10. Rakowska A., 2015, Konstrukcje wsporcze wysokonapięciowych linii napowietrznych – nowe koncepcje, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 9, s.3-8.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Nowicki J., Morskie farmy wiatrowe, 2019, XXII Sympozjum Oddziału Poznańskiego SEP Sieci i instalacje, s.1-4.

2. Dymek D., Jastrzębska E., Kurbiel W., 2013, Awarie linii elektroenergetycznych wywołane oblodzeniem, XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane.

Rozporządzenia

1. Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie Polityki energetycznej państwa do 2040 r. (Monitor Polski z dnia 10.03.2021 r., poz. 264).
2. Ustawa z dnia 17 grudnia 2020 r. o promowaniu wytwarzania energii elektrycznej w morskich farmach wiatrowych (Dz.U.2021 poz.234).

Opracowania i raporty z badań

1. Offshore wind in Europe – key trends and statistics 2020; <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/offshore-wind-in-europe-key-trends-and-statistics-2020/report>.
2. Długosz T., <https://www.energetyka.plus/infrastruktura-krytyczna-ochrona-infrastruktury-krytycznej>, 2021.
3. <https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-roczne-z-funkcjonowania-kse-za-rok-2021>.
4. Meteorological data for assessing climatic loads on overhead lines, TB CIGRE, No 645, 2016, s.1-42.

Komunikaty Internetowe

1. https://ec.europa.eu/info/publications/220202-sustainable-finance-taxonomy-complementary-climate-delegated-act_en
2. <https://www.gov.pl/web/premier/zalozenia-do-aktualizacji-polityki-energetycznej-polski-do-2040-r-pep2040-wzmocnienie-bezpieczenstwa-i-niezaleznosci-energetycznej>
3. <https://www.parkiet.com/analizy-rynkowe/art35662841-pionierzy-morskich-farm-wiatrowych-ida-na-zakupy>
4. <https://wysokienapiecie.pl/41278-sieci-dla-morskiej-energii-inwestycje-juz-na-horyzoncie/>
5. <https://wysokienapiecie.pl/70132-sieci-kluczowe-dla-rozwoju-zielonej-energii/>
6. <https://szczecin.wyborcza.pl/szczecin/7,34939,28134597,wiatr-zniszczyl-75-linii-wysokiego-i-700-sredniego-napiecia.html>
7. <http://kromiss-bis.pl/energetyka/#realizacje>

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the Ministry of Education and Science, grant number 0071/SBAD/4660.

ELECTRICITY AND ITS ROLE IN CRITICAL INFRASTRUCTURE

Abstract

The paper presents the scope of operation of the National Power System, planned changes in the electricity generation sector and objectives of activities aimed at ensuring the reliable operation of the system. The condition and threats to the proper operation of the power grid were also discussed, focusing primarily on the effects of extreme weather conditions.

Keywords: energy security, renewable energy, electricity grid

Aleksandra ROSIŃSKA*
Sebastian CHWALIBOGOWSKI**

BEZPIECZEŃSTWO INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ NA PRZYKŁADZIE PRZEDSIĘBIORSTWA GAZOWEGO

Infrastruktura krytyczna to pojęcie, pod którym kryją się obiekty istotne ze względu na prawidłowe funkcjonowanie państwa. Zalicza się do niego różne systemy, w tym także te zaopatrujące w energię, surowce energetyczne i paliwa. Przykładem obiektu infrastruktury krytycznej jest przedsiębiorstwo gazowe. W celu oceny gwarancji ciągłości transportu medium, jakim jest gaz ziemny, dokonano badania ankietowego. Badanie przeprowadzono wśród pracowników przedsiębiorstwa EuRoPol GAZ s. a.

Słowa kluczowe: infrastruktura krytyczna, gaz ziemny, bezpieczeństwo.

1. WPROWADZENIE

Zgodnie z definicją Rządowego Centrum Bezpieczeństwa, infrastruktura krytyczna (IK) to rzeczywiste i cybernetyczne systemy, czyli obiekty, urządzenia bądź instalacje, niezbędne do minimalnego funkcjonowania gospodarki i państwa. Jednak nie każdy istotny obiekt jest zaliczany do grona obiektów infrastruktury krytycznej. O tym, czy obiekt zalicza się do IK, decydują szczegółowe kryteria zapisane w niejawnym załączniku do Narodowego Programu Ochrony Infrastruktury Krytycznej [1].

Według ustawy o zarządzaniu kryzysowym, infrastruktura krytyczna to systemy oraz wchodzące w ich skład powiązane ze sobą obiekty, w tym obiekty budowlane, urządzenia, instalacje oraz usługi, które są kluczowe dla bezpieczeństwa państwa i obywateli. Dodatkowo mają one służyć zapewnieniu sprawnego funkcjonowania administracji publicznej, instytucji oraz przedsiębiorców [2].

Infrastruktura krytyczna obejmuje systemy:

- zaopatrzenia w energię, surowce energetyczne i paliwa,

* Politechnika Poznańska, Instytut Energetyki Ciepłej

** System Gazociągów Tranzytowych EuRoPol GAZ s. a.

- łączności,
- sieci teleinformatycznych,
- finansowe,
- zaopatrzenia w żywność,
- zaopatrzenia w wodę,
- ochrony zdrowia,
- transportowe,
- ratownicze,
- zapewniające ciągłość działania administracji publicznej,
- produkcji, składowania, przechowywania i stosowania substancji chemicznych i promieniotwórczych, w tym rurociągi substancji niebezpiecznych.

Ochrona infrastruktury krytycznej jest realizowana oraz koordynowana przez Rządowe Centrum Bezpieczeństwa (RCB). Każdego roku Dyrektor Rządowego Centrum Bezpieczeństwa przekazuje Komisji Europejskiej informacje na temat liczby infrastruktur krytycznych, natomiast co dwa lata składane jest sprawozdanie zawierające ogólne dane dotyczące rodzajów ryzyka, zagrożeń i słabych punktów stwierdzonych w każdym z systemów, w których została wyznaczona europejska infrastruktura krytyczna.

Podstawowym zadaniem RCB jest dokonywanie analizy zagrożeń na podstawie informacji pozyskanych ze wszystkich ośrodków kryzysowych, które funkcjonują z ramienia administracji publicznej. Ponadto do funkcji RCB należy także opracowywanie optymalnych rozwiązań na wypadek pojawienia się sytuacji kryzysowych, ale również sprawowanie nadzoru nad przepływem informacji dotyczących zagrożeń [3].

2. MATERIAŁY I METODY

Do grona obiektów IK zalicza się w pierwszej kolejności obiekty zaopatrujące państwo w paliwa i surowce energetyczne. Jednym z przykładów podmiotu posiadającego obiekt IK może być przedsiębiorstwo zajmujące się transportem gazu. Na terenie Polski usługi takie świadczy m.in. System Gazociągów Tranzytowych EuRoPol GAZ s. a., bowiem celem strategicznym funkcjonowania spółki jest bezpieczna, przyjazna dla środowiska oraz niezawodna obsługa w zakresie transportu gazu ziemnego rurociągiem Jamał-Europa.

EuRoPol GAZ jest polską spółką, która działa od 1993 roku. Firma powstała 23 września 1993 roku, a 15 grudnia 1993 r. została zarejestrowana przez Sąd Rejonowy w Warszawie.



Rys. 1. Budynek spółki EuRoPol GAZ s. a [4]

Przedsiębiorstwo jest właścicielem polskiej części gazociągu Jamał-Europa o długości ok. 684 km, który jest jednym z najnowocześniejszych i największych projektów energetycznych w Europie na przełomie XX i XXI wieku. Dodatkowe informacje na temat przedsiębiorstwa zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

EuRoPol GAZ s. a. – dodatkowe informacje

<i>Maksymalne ciśnienie robocze</i>	8,4 MPa
<i>Średnica gazociągu</i>	1400 mm
<i>Punkt wejścia</i>	Kontratki
<i>Punkty wyjścia</i>	Mallnow, Lwówek, Włocławek
<i>Tłocznie gazu na terenie Polski</i>	Kontratki, Zambrów, Ciechanów, Włocławek, Szamotuły



Rys. 2. Widok tłoczni gazu należącej do EuRoPol GAZ s. a [5]

Ponadto gazociąg tranzytowy jest wyposażony w zespoły podłączeniowe tłoczni oraz komory nadania i odbioru tłoka, a także 8 stacji ochrony katodowej i 1 stację anod galwanicznych. Całość współdziała z systemem telemechaniki i zarządzania SCADA [6].

Na przedsiębiorstwo składają się następujące obiekty:

- siedziba spółki,
- tłocznie gazu,
- system rurociągów.

Tłocznia gazu składa się z elementów takich jak:

- rurociągi,
- jednostki napędowe,
- reduktory ciśnienia,
- armatura regulacyjna,
- filtry,
- chłodnice,
- przyrządy pomiarowe,
- stacje nadania i odbioru tłoka czyszczącego,
- budynki gospodarcze i dyspozytornia,
- system sterowania,
- monitoring.



Rys. 3. Zespół Zaporowo-Upustowy

Awaria niektórych elementów tłoczni może stanowić poważny problem, który może spowodować zakłócenie przepływu gazu, a co za tym idzie – destabilizację w zakresie dostarczania gazu do odbiorcy.

W celu zweryfikowania niezakłóconej pracy przedsiębiorstwa oraz ciągłości dostaw gazu przeprowadzono wśród osób pracujących w spółce badanie ankietowe. Ankieta jest jedną z technik badawczych, która polega na zbieraniu informacji poprzez zadawanie pytań [7].

Kierowane do respondentów pytania dotyczyły występowania na terenie tłoczni systemów monitoringu, ochrony, czujników, detektorów ruchu, kamer termowizyjnych, weryfikacji danych oraz agregatów prądotwórczych. Poruszona została również kwestia tego, czy na terenie tłoczni miały kiedykolwiek miejsce sytuacje o charakterze zagrażającym zdrowiu lub życiu pracowników, takie jak zalanie pomieszczeń, pożar, wtargnięcie osób nieupoważnionych, wandalizm, choroba zakaźna lub rozpylenie substancji toksycznych bądź promieniotwórczych. Kolejne pytanie dotyczyło sytuacji o charakterze zagrażającym utrzymaniu ciągłości przepływu medium. Mowa tu o awarii sprzętu, szkodnikach, pożarze, wandalizmie, wstrzymaniu dostaw prądu, wtargnięciu dzikich zwierząt, oblodzeniu i intensywnych opadach śniegu, uszkodzeniu elementów tłoczni, utrudnionej łączności lub jej całkowitym braku, ale także o błędzie spowodowanym przez pracownika. Dalej respondenci mieli odpowiedzieć na pytanie, czy na terenie tłoczni zaistniała kiedykolwiek sytuacja o charakterze terrorystycznym, np. podłożenie ładunków wybuchowych, umyślne spowodowanie awarii, umyślne spowodowanie

zakażenia bądź skażenia, naruszenie praw człowieka, akty przemocy wobec pracowników oraz cyberterroryzm. Na koniec padły następujące kwestie uzupełniające:

- Czy w pobliżu/na terenie tłoczni znajdują się służby porządkowe (policja, straż pożarna, ratownictwo medyczne)?
- Czy na wypadek zdarzeń niepożądanych przedsiębiorstwo posiada przygotowane scenariusze zapobiegania zagrożeniu/usuwania skutków zagrożenia?
- Czy przedsiębiorstwo posiada przygotowane plany ewakuacyjne na wypadek wystąpienia zagrożenia?
- W jakim stopniu Pani/Pana zdaniem przedsiębiorstwo jest przygotowane na wypadek wystąpienia zagrożenia?

Powyższe pytania, skierowane do pracowników przedsiębiorstwa, powinny dać odpowiedź, czy przedsiębiorstwo, zaliczające się do infrastruktury krytycznej, jest w stanie utrzymać ciągłość przepływu medium, czy może należałoby zwrócić szczególną uwagę na któryś z aspektów i poddać go modyfikacji ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego.

3. WYNIKI I DYSKUSJA

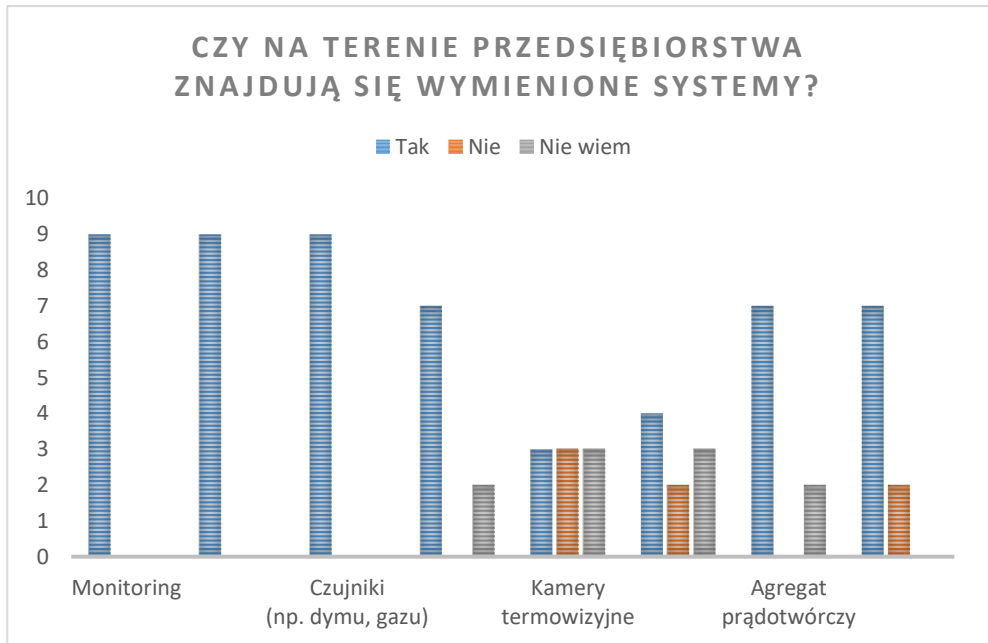
W badaniu ankietowym wzięło udział 9 pracowników przedsiębiorstwa SGT EuRoPol GAZ S.A. Pośród nich można było wyróżnić 3 kobiety oraz 6 mężczyzn w przedziałach wiekowych 36-50 oraz 51-65 lat. Każdy z pracowników posiada wykształcenie co najmniej wyższe, a 6 osób wyższe podyplomowe. Ponadto 8 respondentów to osoby zamieszkujące miasto, a tylko jedna to mieszkaniec wsi. Spośród osób wypełniających ankietę wyróżnić można następujące stanowiska:

- kierownicze: 5 osób,
- pracownik administracji: 2 osoby,
- programista/informatyk: 1 osoba,
- inne stanowisko: 1 osoba.

Każda spośród ankietowanych osób pracuje w przedsiębiorstwie co najmniej 5 lat, przy czym 3 osoby mają za sobą staż pracy w przedziale od 5 do 10 lat, 2 osoby pracują w firmie od 10 do 15 lat, a 4 osoby więcej niż 15 lat.

Można więc powiedzieć, że respondenci to doświadczeni pracownicy, a staż pracy jest wystarczający, by określić, czy w przedsiębiorstwie miały miejsce zdarzenia niepokojące bądź niebezpieczne.

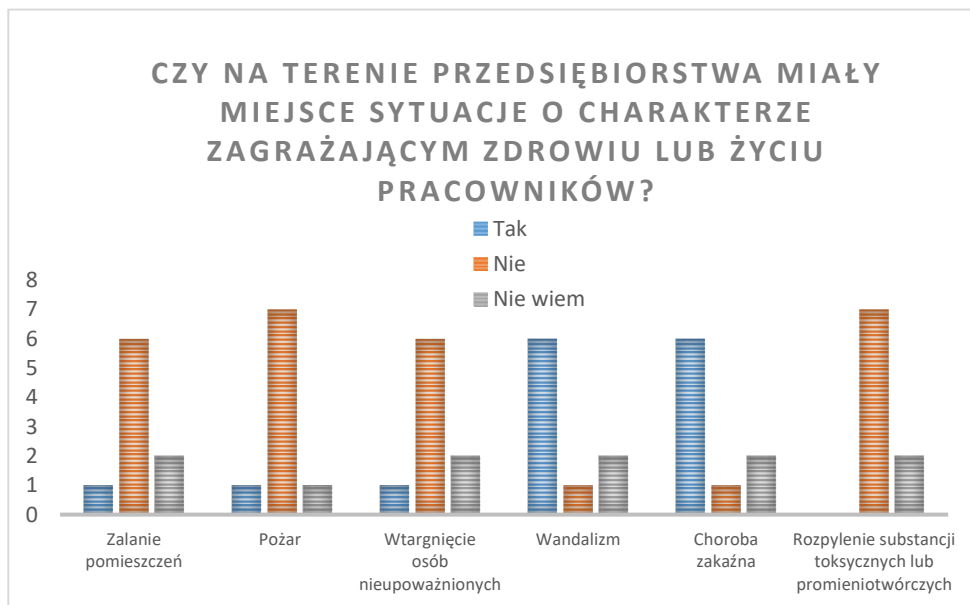
Na pytanie, czy w obrębie przedsiębiorstwa znajdują się narzędzia wspomagające system bezpieczeństwa, ankietowani odpowiadali w sposób przedstawiony na poniższym wykresie.



Rys. 4. Zestawienie odpowiedzi na pytanie dotyczące systemów bezpieczeństwa

Na podstawie wyników można wywnioskować, że obiekty, w których zatrudnieni są respondenci, wyposażone są w monitoring, ochronę oraz czujniki substancji niebezpiecznych. Środki te stanowią minimum, jeśli chodzi o weryfikację poziomu bezpieczeństwa na terenie tłoczni gazu. W niektórych przypadkach budynki należące do przedsiębiorstwa SGT EuRoPol GAZ S.A. uzbrojone są również w detektory ruchu, kamery termowizyjne, systemy weryfikacji danych, agregat prądowórczy oraz ogrodzenie. Są to dodatkowe środki, które z pewnością wywierają wpływ na utrzymanie ciągłości przepływu medium, jakim jest gaz.

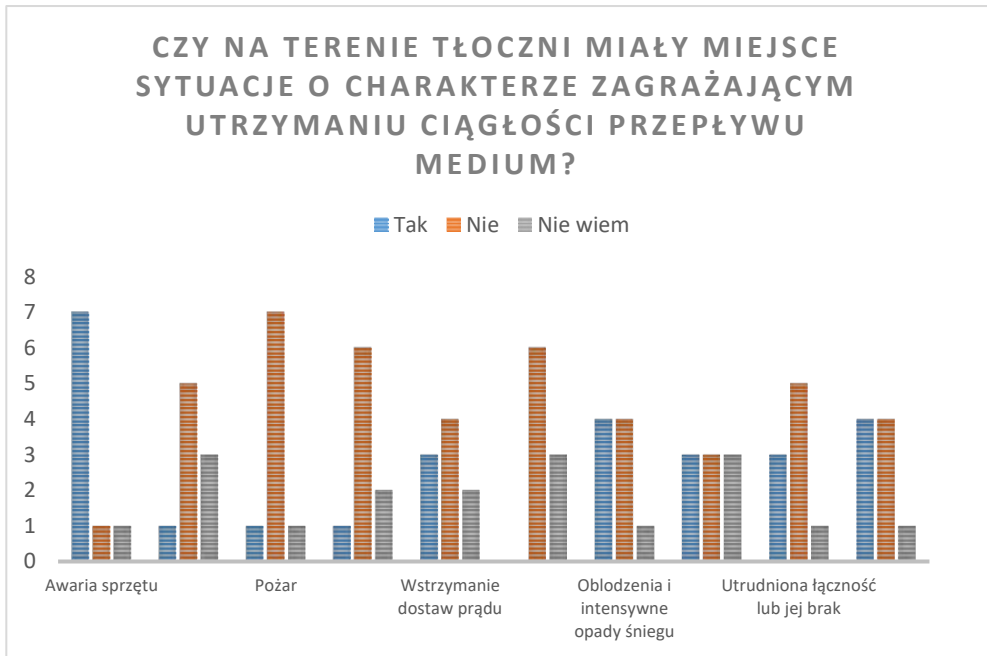
Kolejne postawione pytanie dotyczyło zaistnienia sytuacji o charakterze zagrażającym zdrowiu lub życiu pracowników.



Rys. 5. Zestawienie odpowiedzi na pytanie dotyczące sytuacji zagrażających zdrowiu lub życiu pracowników

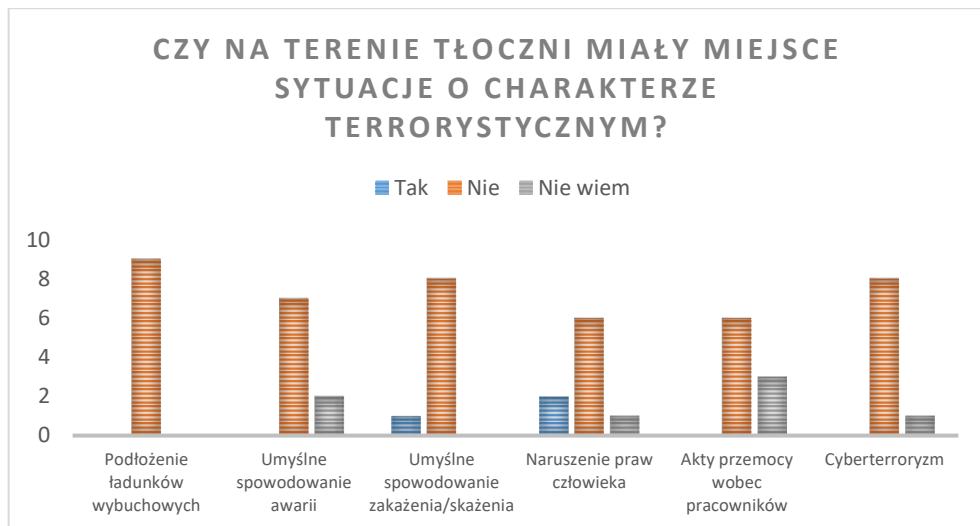
Jak wynika z powyższego wykresu, w większości przypadków nie dochodziło do zalania pomieszczeń, pożarów, wtargnięcia obcych osób oraz rozpylenia substancji szkodliwych. Na obiektach przedsiębiorstwa SGT EuRoPol GAZ S.A. dochodziło jednak do aktów wandalizmu oraz pojawienia się choroby zakaźnej. To ostatnie mogło mieć związek z panującą w ostatnich latach pandemią.

Na podstawie odpowiedzi na pytanie dotyczące zaistnienia sytuacji o charakterze zagrażającym utrzymaniu ciągłości przepływu medium można wywnioskować, iż najczęstszą przyczyną wstrzymania bądź utrudnienia przepływu gazu jest awaria sprzętu. Rzadziej było to wstrzymanie dostaw prądu, warunki pogodowe oraz błąd ludzki.



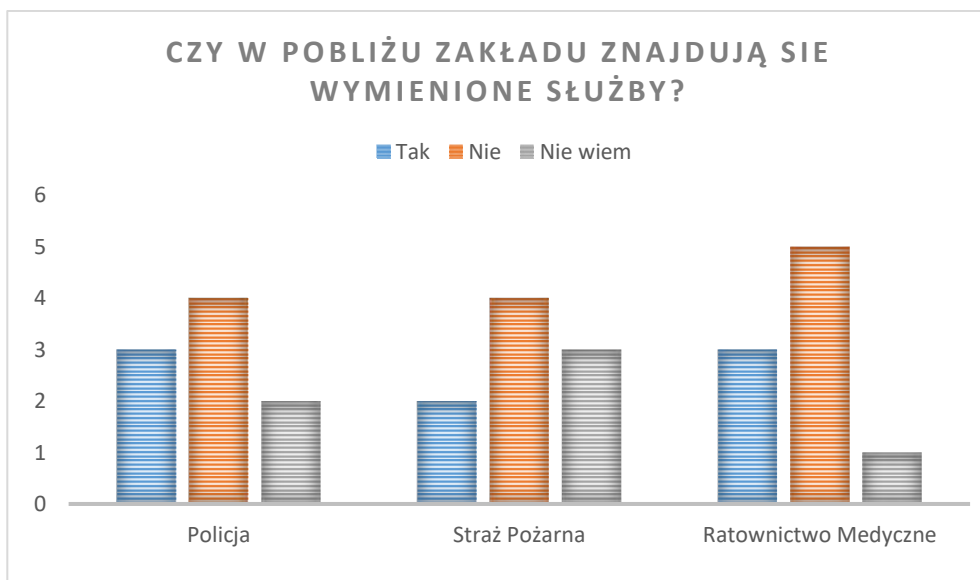
Rys. 6. Zestawienie odpowiedzi na pytanie dotyczące sytuacji zagrażających utrzymaniu ciągłości przepływu gazu

Respondenci zapytani o zaistnienie na terenie przedsiębiorstwa sytuacji o charakterze terrorystycznym w większości przypadków wybierali odpowiedź negującą. Zdarzały się jedynie pojedyncze przypadki umyślnego spowodowania zakażenia bądź skażenia oraz naruszenia praw człowieka.



Rys. 7. Zestawienie odpowiedzi na pytanie dotyczące sytuacji o charakterze terrorystycznym

Kolejne pytanie postawione w ankiecie dotyczyło dostępu do służb ratowniczych.



Rys. 8. Zestawienie odpowiedzi na pytanie dotyczące dostępu do służb ratowniczych

Z odpowiedzi ankietowanych wynika, że w pobliżu większości komórek przedsiębiorstwa nie znajdują się służby ratownicze oraz porządkowe. Fakt ten może mieć znaczący wpływ w przypadku wystąpienia na terenie tłoczni bądź budynku spółki sytuacji zagrażającej zdrowiu lub życiu pracowników. W przedsiębiorstwie energetycznym, zajmującym się transportem paliw, kluczowe jest bliskie sąsiedztwo obiektu ze strażą pożarną. Jej obecność warunkuje możliwie szybkie usunięcie przyczyn wstrzymania przepływu medium.

4. WNIOSKI

Zapewnienie bezpieczeństwa w sektorze energetycznym to jedno z najważniejszych zadań stawianych przed rządami każdego kraju. Bezpieczeństwo energetyczne jest warunkiem godnego życia w społeczeństwie. Można powiedzieć, że jest ono podstawą rozwoju państwa. Należy więc nieustannie monitorować stan obiektów należących do IK, zwracając szczególną uwagę na możliwość powstania nowych zagrożeń. Rozwój cywilizacyjny może przynieść nowe, całkiem nieznane zagrożenia – jeszcze kilka lat temu nie istniało przecież pojęcie cyberterroryzmu.

Na przykładzie analizowanego przedsiębiorstwa oraz wykonanego badania ankietowego można dojść do kilku wniosków. Należałoby rozważyć unowocześnienie systemu monitoringu wizyjnego i zdalnej kontroli za pomocą statków bezałogowych obiektów bezobsługowych zlokalizowanych wzdłuż gazociągu.. Dodatkowo wprowadzenie w każdym obiekcie systemu monitoringu wizyjnego, który pozwoli na weryfikacji wtargnięciu na teren przedsiębiorstwa osób niepożądanych.

Na pytania postawionego w ankiecie, czy na wypadek zdarzeń niepożądanych przedsiębiorstwo posiada przygotowane scenariusze zapobiegania zagrożeniu / usuwania skutków zagrożenia, oraz czy przedsiębiorstwo posiada przygotowane plany ewakuacyjne na wypadek wystąpienia zagrożenia, wszyscy ankietowani odpowiedzieli twierdząco. Świadczy to o co najmniej podstawowym przygotowaniu przedsiębiorstwa na ewentualność wystąpienia sytuacji niebezpiecznych. Na korzyść przedsiębiorstwa pod względem zapewnienia bezpieczeństwa przemawiają również odpowiedzi respondentów na ostatnie postawione w ankiecie pytanie, w którym należało oszacować przygotowanie przedsiębiorstwa na wypadek wystąpienia zagrożenia. W tym pytaniu należało określić wartość w skali od 1 do 10, gdzie odpowiedź 1 oznaczała niski stopień przygotowania, a odpowiedź 10 – najwyższy stopień przygotowania. Respondenci w odpowiedzi na to pytanie opowiadali się za stopniami 8 (dwie osoby), 9 (trzy osoby) oraz 10 (cztery osoby). Podsumowując, przedsiębiorstwo gazowe w sposób nienaganny wykonuje swoje zadanie, o czym świadczyć może chociażby brak informacji o jakichkolwiek poważniejszych awariach. Wyniki ankiety wskazują, że w przedsiębiorstwie

najczęstszymi sytuacjami, które mogą zagrażać ciągłości przepływu gazu ziemnego są awarie sprzętu, akty wandalizmu oraz choroba zakaźna. Należałoby więc podjąć działania, które spowodują wyeliminowanie a przynajmniej zredukowanie liczby tego typu zdarzeń.

5. LITERATURA

1. <https://www.gov.pl/web/rcb/infrastruktura-krytyczna>
2. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 roku o zarządzaniu kryzysowym (Dzi. U. 2007 Nr 89 poz. 590).
3. <https://www.gov.pl/web/rcb/o-rcb2>
4. <https://www.europolgaz.com.pl/informacje-prasowe/galeria-zdjec/instalacja-rzezbiarska?i=unspecified5-533x800>
5. <https://www.europolgaz.com.pl/informacje-prasowe/galeria-zdjec/tlocznie-gazu?i=bigsize-2548-1920x1281>
6. <https://www.europolgaz.com.pl/en/about-the-pipeline/facts-and-figures>
7. <https://sjp.pl/ankieta>

SECURITY OF CRITICAL INFRASTRUCTURE ON THE EXAMPLE OF A GAS COMPANY

Abstract

Critical infrastructure is a concept that covers objects essential for the proper functioning of the state. It includes various systems, including those supplying energy, energy resources and fuels. An example of a critical infrastructure facility is a gas company. In order to assess the guarantee of the continuity of transport of the medium, which is natural gas, a questionnaire survey was carried out. The survey was conducted among employees of EuRoPol GAZ s. A.

Keywords: critical infrastructure, natural gas, security.

Aleksandra ROSIŃSKA *
Bartosz ZIEGLER*
Michał CIAŁKOWSKI*
Jolanta TOMASZEWSKA**
Andrzej FRĄCKOWIAK*
Krzysztof LEWANDOWSKI**

MINIMALIZACJA STRAT ENERGII W KANAŁE O ZMIENNYM PRZEKROJU W PROCESIE PRZETWARZANIA TWORZYW SZTUCZNYCH

Tworzywa sztuczne są powszechnie wykorzystywane na całym świecie. Ze względu na niską cenę, łatwość formowania oraz pozostałe właściwości, są one szeroko stosowane w wielu gałęziach przemysłu. Polimery, tak jak inne materiały, posiadają swoiste cechy fizyczne. Do jednej z tych cech należy lepkość, która wywiera wpływ na charakter przepływu polimeru w stanie ciekłym. Badaniu poddano sześć różnych modeli kapilary pomiarowej, która jest elementem składowym reometru kapilarnego. Wyniki pokazują, że poprzez zmianę kształtu elementu pomiarowego możliwe jest uzyskanie oszczędności w postaci minimalizacji strat ciśnienia przy przepływie polimeru przez kapilarę.

Słowa kluczowe: płyn nienewtonowski, obliczeniowa mechanika płynów, tworzywa polimerowe

1. WPROWADZENIE

Tworzywa sztuczne, czyli polimery o bardzo dużej masie cząsteczkowej, są powszechnie wykorzystywane na całym świecie. W roku 2015 światowa produkcja tego typu materiału osiągnęła wielkość 322 milionów ton. Prognozowany jest ciągły wzrost zużycia tworzyw, co przekłada się na rozwój tej dziedziny gospodarki [Lewandowski et al. 2014]. Tworzywa polimerowe to jedno ze źródeł oszczędności zasobów naturalnych, ponieważ jest to materiał dzięki któremu można zaoszczędzić więcej surowców kopalnianych w porównaniu do tego, ile zużywa się go podczas

* Politechnika Poznańska, Instytut Energetyki Ciepłej

** Zakład Technologii Polimerów i Powłok Ochronnych, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Politechnika Bydgoska

jego produkcji. Im więcej stosuje się tworzyw sztucznych, tym mniej zasobów naturalnych jest zużywanych [Ehrenstrin i Brocka-Krzemińska 2016]. Wspomniana masa produkowanych tworzyw sztucznych jest związana ze zużyciem energii w procesie ich wytwarzania różnych jej form użytkowych we wtryskarkach czy wyłaczarkach. Przepływ polimerów w tych maszynach odbywa się przez kanały o zmiennym przekroju. Powstaje zatem problem zmniejszenia zużycia energii z zachowaniem tego samego strumienia przetłaczanego polimeru. Istotne jest więc kształtowanie kanałów przepływowych z uwzględnieniem tego kryterium. Tworzywa sztuczne są wykorzystywane szeroko między innymi w budownictwie, elektrotechnice jak również w przemyśle rolniczym czy motoryzacyjnym, Ponadto w produkcji artykułów gospodarstwa domowego, meblarstwie, opakowaniach i wielu innych dziedzinach życia codziennego [Frącz 2012].

Do tak powszechnego stosowania tworzyw sztucznych przyczynia się:

- stosunkowo niska cena,
- łatwość formowania polimerów,
- wyjątkowe właściwości takie jak dobre właściwości izolacji cieplnej i elektrycznej, możliwość uzyskania tworzywa w różnych kolorach, niski koszt oraz łatwość przetwarzania.

Oprócz tego tworzywa sztuczne cechują się tym, iż są lekkie (lżejsze od metali czy chociażby materiałów ceramicznych) [Wilczyński 2018].

Tworzywa sztuczne, tak jak inne materiały, mają swoje pewne właściwości fizyczne oraz chemiczne. Jedną z najbardziej istotnych właściwości fizycznych polimeru jest jego lepkość z uwagi na fakt, iż tworzywa polimerowe są zazwyczaj przetwarzane w postaci płynnej. Lepkość to miara oporów stawianych przez materiał podczas płynięcia [Wilczyński 2001]. W ogólnym ujęciu jest ona definiowana jako stosunek naprężeń ścinających do szybkości ścinania:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

gdzie:

η – lepkość [Pa*s],

τ – naprężenie ścinające [Pa],

$\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania [1/s].

Lepkość jest w tym ujęciu liniowym stosunkiem naprężeń ścinających do szybkości ścinania. Proporcjonalność, jaka tu zachodzi, jest charakterystyczna dla materiałów takich jak woda oraz stopione metale. Jednakże w przypadku polimerów zależność ta nie jest liniowa – ma charakter nienewtonowski, czyli taki, w którym lepkość materiału nie jest stała, lecz jest zależna od szybkości ścinania [Lewandowski, Piszczek i Kaczmarek 2014]. Oprócz tego, wpływ na lepkość polimerów ma także temperatura, ciśnienie oraz masa cząsteczkowa. Wraz ze

wzrostem temperatury oraz szybkości ścinania lepkość tworzyw maleje, jednakże przy wzroście ciśnienia i masy cząsteczkowej lepkość się zwiększa.

Lepkość płynów o charakterze nienewtonowskim opisywana jest za pomocą odpowiednich modeli reologicznych. Definiują one zależność lepkości od szybkości ścinania, a niekiedy również od temperatury [Plaskota 2004]. Jednym z modeli opisujących lepkość polimerów jest model Ostwalda-de Waele'a [Peryt-Stawiarska, Murasiewicz i Jaworski 2014]. Jest to model potęgowy, który przybiera postać zależności:

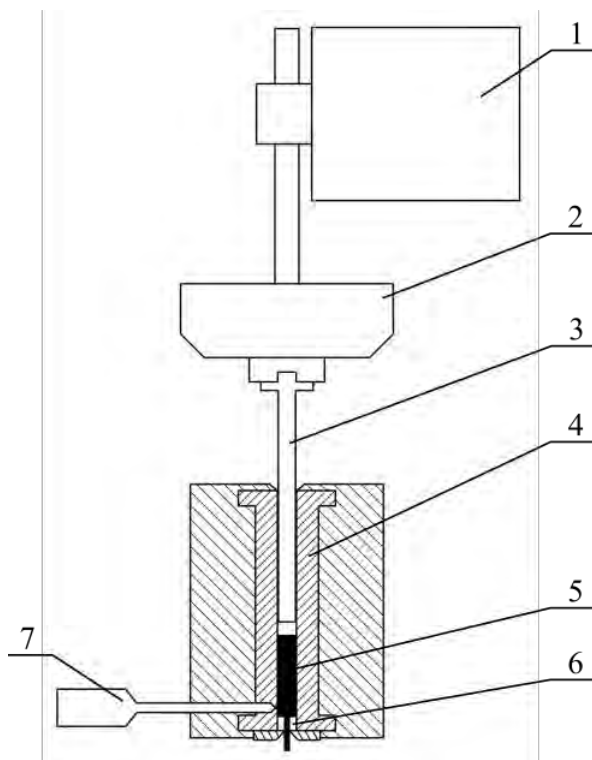
$$\eta(\dot{\gamma}) = m * \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (2)$$

gdzie:

m – współczynnik konsystencji [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$],

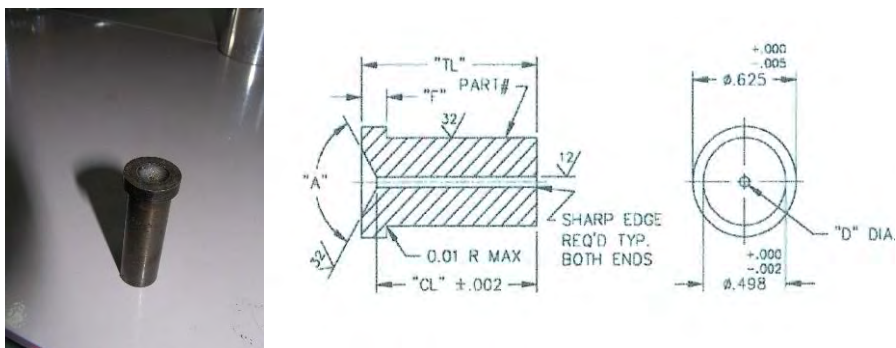
n – wykładnik płynięcia [-].

Lepkość tworzyw polimerowych wyznaczana jest na podstawie badań wykonywanych przy użyciu reometru kapilarnego, który przedstawiony jest na rysunku 1.



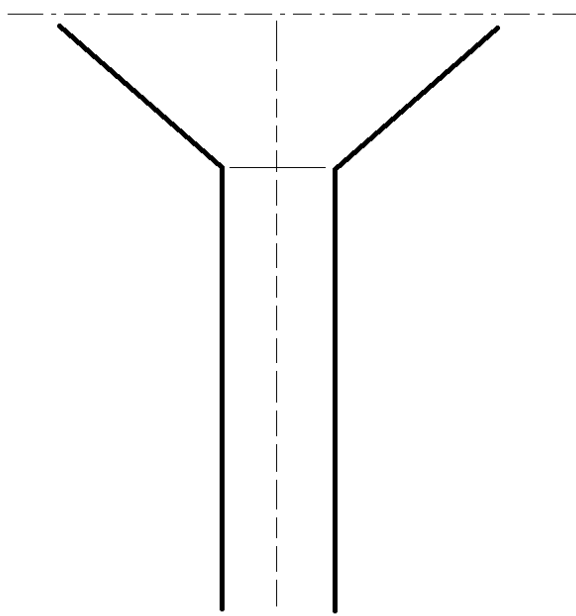
Rys. 1. Schemat budowy reometru kapilarnego: 1 – mechanizm zapewniający określony posuw tłoka, 2 – czujnik nacisku, 3 – tłok, 4 – termostatowany cylinder, 5 – uplastycznione tworzywo polimerowe, 6 – kapilara pomiarowa, 7 – czujnik ciśnienia [9]

Jednym z najważniejszych elementów reometru jest kapilara pomiarowa (element 6 przedstawiony na rysunku 1). Jest to niewielki element wymienny stanowiska badawczego. Pomiary wykonywane są w temperaturze 190°C przy zastosowaniu kapilar pomiarowych różnych długości. Dane techniczne kapilary przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Kapilara pomiarowa

Kapilara przybiera więc kształt kanału zbieżnego (opisanego równaniem liniowym):



Rys. 3. Kształt kapilary

Z przepływowego punktu widzenia zmiana średnicy kanału z niezachowaniem gładkiego przejścia (nieciągłą pierwszą pochodną) powoduje powstawanie wirów

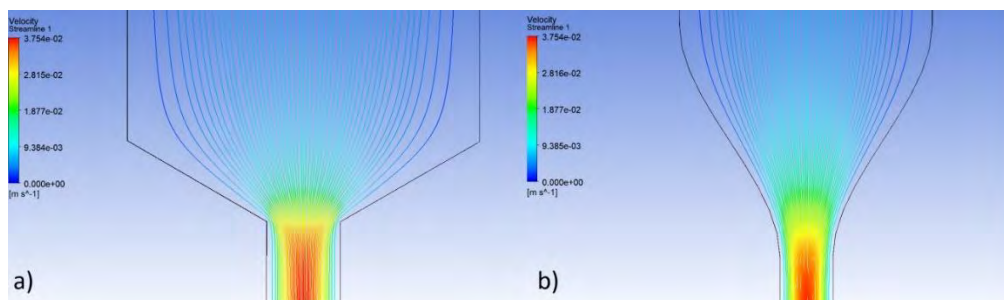
i obszarów zastoju co zaznaczono na rysunku 4, przeprowadzając eksperyment z przepływem wody.



Rys. 4. Zjawisko przepływu wody przez kanał o kształcie opisanym nieciągłą pierwszą pochodną (niebieskim kolorem zaznaczono jedną ze stref powstawania wirów; kolorem czerwonym oznaczono strefę zastoju)

Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule jest likwidacja miejsc oderwań przez kształtowanie kanału wypływowego, czyli miejsc występowania wirów oraz zastoju, które powodują powstawanie strat ciśnienia podczas przepływu płynu (w szczególności przepływu płynnego polimeru).

Na rysunku 5 przedstawiono symulację przepływu wody przez dwa kanały o różnych geometriach, gdzie dochodzi do zmniejszania się przekroju przepływowego, co jest charakterystyczne w kanałach wtryskarek oraz wytłaczarek tworzyw sztucznych. Dla kanału 5a przejście jest ostro-krawędziowe (I pochodna wzdłuż konturu kanału w przekrojach przejściowych jest nieciągła). W przekrojach przejścia kanału o stałej średnicy do kanału o zmiennej średnicy krzywe przejścia zachowują ciągłość I pochodnej – rysunek 5b.



Rys. 5. Przepływ wody przy zastosowaniu dwóch różnych geometrii kanału przejściowego – symulacja wykonana w programie ANSYS (5a – kanał opisany nieciągłą I pochodną, 5b – kanał opisany przy zachowaniu ciągłości I pochodnej)

Wynikiem powyższej symulacji jest rozkład prędkości. Na podstawie widocznej symulacji można zauważyć, że linie prądu w przypadku kształtu kanału opisanego wielomianem trzeciego stopnia wypełniają większy obszar niż w przypadku kanału, gdzie styczne przejście nie jest zachowane.

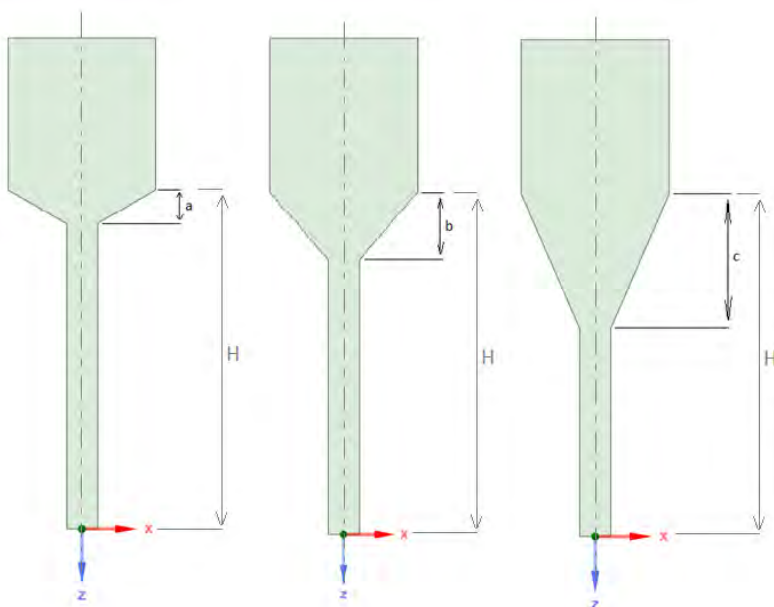
2. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Przedstawione wyniki symulacji wskazują na konieczność zmiany geometrii kapilary (kanału przejściowego). Rozważane są dwie możliwości kanału przejściowego o różnych długościach:

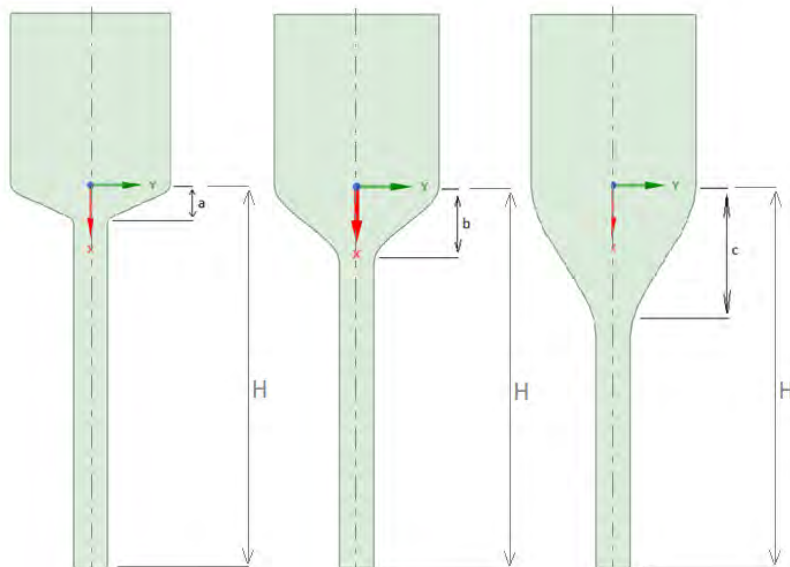
- w postaci stożka ściętego,
- w postaci kanału zachowującego styczny wpływ i styczny wypływ (powierzchnia boczna kanału jest opisana wielomianem III stopnia).

W celu uniknięcia ostrych zakrzywień w geometrii kanału, należy zastosować jak najbardziej płynne przejście ze średnicy o wymiarze 9,55 mm do 2 mm. W tym celu zastosowano równanie krzywej opisanej wielomianem trzeciego stopnia, co umożliwi styczne wejście i wyjście kanału o wymiarach opisanych powyżej. Wydłużona została również część wlotowa, jednak bez zwiększania całkowitej długości elementu wymiennego. Długości części wlotowej, jakie przyjęto w celu uzyskania wyników badań, to 2,18 mm, 4,36 mm oraz 8,72 mm, przy jednoczesnym zachowaniu stałej wartości długości kanału $H=22,18$ mm.

Symulacja przepływu przez przedstawione powyżej kanały jest możliwa dzięki programowi Ansys. Jest to narzędzie, które wykorzystuje się do wykonywania obliczeniowej dynamiki płynów (CFD – Computational Fluid Dynamics) [Ansys CFX...].



Rys. 6. Geometria kanału zbieżnego – wydłużenie części wlotowej ($a = 2,18$ mm, $b = 4,36$ mm, $c = 8,72$ mm, $H=22,18$ mm)



Rys. 7. Geometria kanału przejściowego opisanego wielomianem trzeciego stopnia – wydłużenie części wlotowej ($a = 2,18$ mm, $b = 4,36$ mm, $c = 8,72$ mm, $H=22,18$ mm)

Kryteria przepływowe, jakie zastosowano w celu wykonania symulacji, zestawiono w tabeli 1.

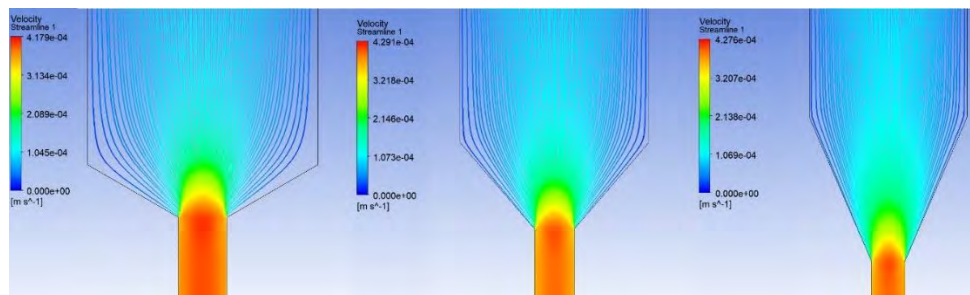
Tabela 1

Kryteria przepływowe zastosowane w symulacji [11]

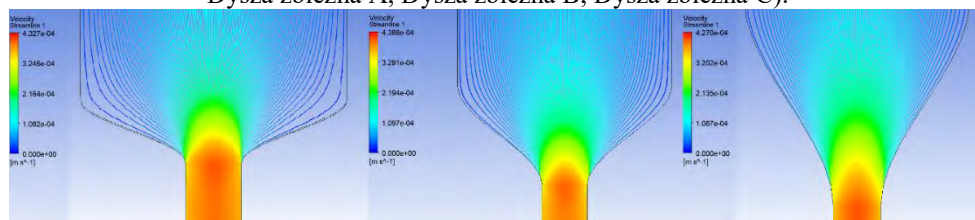
Kryterium	Wartość
Strumień masy na wlocie	0.0007 [kg/s]
Ciśnienie na wylocie	1 [bar]
Gęstość przepływającego polimeru	910 [kg/m ³]
Ciepło właściwe	1700 [J/kg*K]
Przewodność cieplna	0,4 [W/m*K]
Parametr lepkości – współczynnik konsystencji	1813,47 [Pa*s]
Parametr lepkości – wykładnik płynięcia	-0,44 [-]

3. WYNIKI I DYSKUSJA

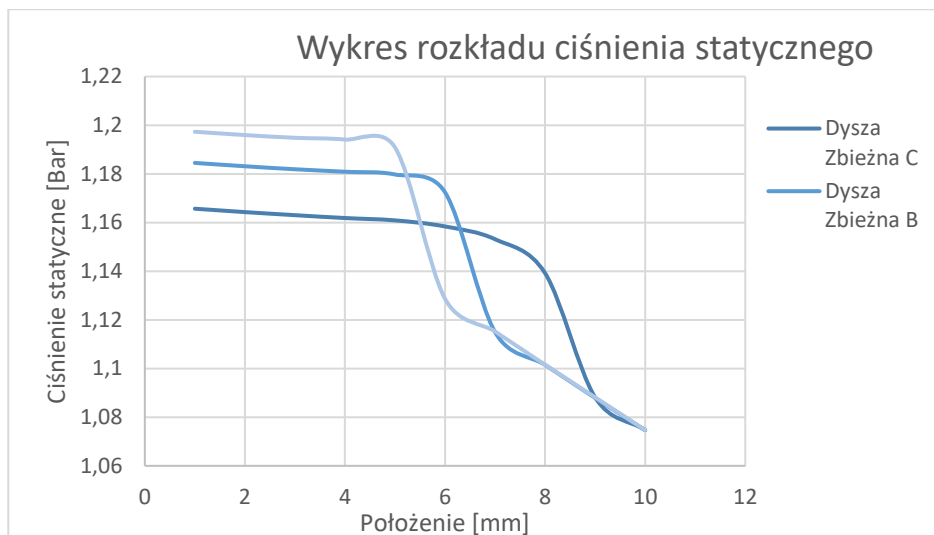
Kanał na wlocie do sekcji pomiarowej został przedłużony, by zapobiec zakłóceniom przepływu spowodowanych wlotem do badanej sekcji. Sekcja pomiarowa to część kanału, w której dochodzi do zakłóceń przepływu płynu nienewtonowskiego. Wyniki symulacji zestawiono na rysunkach 8 oraz 9.



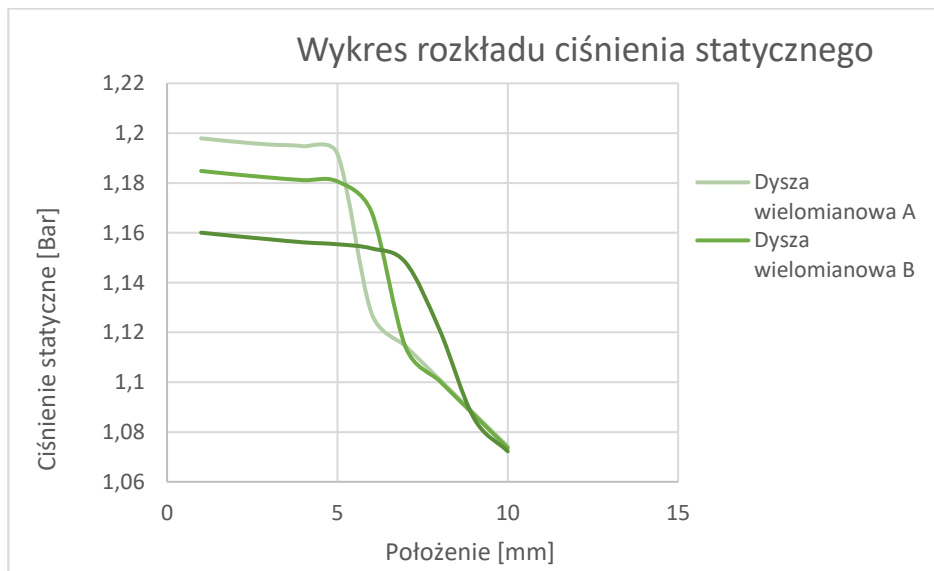
Rys. 8. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały zbieżne (kolejno od lewej: Dysza zbieżna A, Dysza zbieżna B, Dysza zbieżna C).



Rys. 9. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały opisane wielomianem trzeciego stopnia (kolejno od lewej: Dysza wielomianowa A, Dysza wielomianowa B, Dysza wielomianowa C)



Rys. 10. Wykres rozkładu ciśnienia statycznego dla kanałów zbieżnych



Rys. 11. Wykres rozkładu ciśnienia statycznego dla kanałów opisanych wielomianem trzeciego stopnia

Na podstawie symulacji uzyskano również wyniki rozkładu ciśnienia statycznego na długości elementu. Quasi-stała wartość ciśnienia statycznego zachodzi na długości kanału wlotowego o stałej średnicy.

W zależności od zastosowanej geometrii (a, b, c oraz typu kanału) uzyskano sumarycznie następujące straty ciśnienia:

Tabela 2

Zestawienie wyników strat ciśnienia

Wymiar charakterystyczny	Typ kanału	Całkowita strata ciśnienia
a, H	Kanał opisany nieciągłą pierwszą pochodną	12 260,26 [Pa]
a, H	Kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia	12 373,96 [Pa]
b, H	Kanał opisany nieciągłą pierwszą pochodną	10 987,05 [Pa]
b, H	Kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia	11 120,65 [Pa]
c, H	Kanał opisany nieciągłą pierwszą pochodną	9 096,58 [Pa]
c, H	Kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia	8 783,44 [Pa]

3. WNIOSKI

Przy badaniach przepływu płynów newtonowskich (np. wody lub powietrza) krzywizny opływowe charakteryzujące się stycznym przejściem, czyli wydłużone i mające łagodnie zaokrąglony kształt, wykazują trendy związane ze zmniejszeniem strat ciśnienia. Ma to związek z lepkością przepływającego medium. Lepkość dynamiczna wody (0,00179 Pa*s), w porównaniu do lepkości dynamicznej polimerów, jest bardzo mała (w zależności od rodzaju polimeru, wartość lepkości polimeru to rząd od 10^2 do 10^4 Pa*s). Lepkość ma natomiast wpływ na liczbę Reynoldsa (Re), która określa charakter ruchu płynu. Wartość Re dla przepływu tworzyw polimerowych w warunkach przetwórstwa osiąga wartości w zakresie od 10^{-4} do 10^{-1} . Wyższe wartości są osiągnięte dla przepływu przez kanały o mniejszej średnicy [Kłodziński i Sterzyński 2008]. Ze względu na to, że polimery są cieczami nienewtonowskimi rozrzedzanymi ścinaniem, wraz ze wzrostem prędkości przepływu maleje lepkość polimeru, a tym samym liczba Reynoldsa Re osiąga większą wartość.

Dla wykonanej analizy liczba Reynoldsa osiąga wartość w zakresie nawet do 10^{-8} . Przy tak niskiej wartości nie dochodzi do oderwania warstwy przyściennej na skutek zmiany kierunku przepływu („linie prądu obejmują ścianki”, „linie prądu naśladują krzywiznę cylindra” [Kudela]). Co więcej, zwiększenie długości ściany,

a więc i wydłużenie czasu kontaktu medium ze ścianą spowoduje jej spowolnienie przez dłuższy okres czasu, a co za tym idzie, większe straty ciśnienia.

Wyniki z tabeli nr 2 świadczą o tym, iż spośród analizowanych modeli najmniejsze straty ciśnienia wykazuje kanał, który jest opisany wielomianem trzeciego stopnia (8 783,44 Pa). Zatem stosując wydłużenie kanału przejściowego oraz zaokrąglenie jego kształtu przy zmianie średnicy z wartości 9,55 mm do 2 mm udało się uzyskać bardziej zadowalające wyniki. Zwracając jednak uwagę na wartości strat ciśnienia dla kształtu o wymiarze charakterystycznym „b”, kanał opisany nieciągłą pierwszą pochodną wykazuje mniejsze straty ciśnienia (10 987,05 Pa) niż kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia (11 120,65 Pa). Dla kanałów opisanych wymiarem charakterystycznym „a”, różnica strat ciśnienia jest niewielka (dla kanału opisanego nieciągłą pierwszą pochodną wynosi 12 260,26 Pa, a dla kanału opisanego wielomianem trzeciego stopnia jest to wartość 12 373,96 Pa), jednak straty są większe dla kanału zaokrąglonego. Podczas wykonywania symulacji, dla każdego modelu zastosowano stałą wartość wlotową strumienia masy.

Na podstawie zestawionych w części wynikowej wykresów można stwierdzić, że zastosowanie dyszy wielomianowej powoduje obniżenie ciśnienia wlotowego dla modelu o wymiarze charakterystycznym „c”. Ciśnienie na wylocie z sekcji pomiarowej, dla zastosowanego strumienia masy, jest największe dla kanału opisanego nieciągłą pierwszą pochodną z wymiarem charakterystycznym „c”. Analizując wykresy, można zaobserwować charakter przepływającego polimeru. Dla dyszy opisanej nieciągłą pierwszą pochodną (o najbardziej wydłużonej dyszy) zmiana średnicy kanału ma najłagodniejszy przebieg. Dla dyszy wielomianowej (najbardziej wydłużonej) zachodzi podobna tendencja, jednakże w tym przypadku ciśnienie zaczyna spadać nieco szybciej.

Zatem zastosowanie krzywizny opisanej wielomianem trzeciego stopnia przyniosło pozytywny rezultat w postaci oszczędności energii, natomiast wydłużenie kanału spowodowało zredukowanie strat ciśnienia o 28%. Zgodnie z tendencją, dalsze wydłużanie kanału może przynieść jeszcze większe oszczędności energii.

4. LITERATURA

1. K. Lewandowski, K. Piszczek, S. Zajchowski, J. Mirowski, B. Majchrowicz, Wyznaczanie charakterystyki reologicznej tworzyw polimerowych przy dużych wartościach szybkości ścinania, *Przetwórstwo tworzyw 5* (wrzesień-październik) 2014.
2. Ehrenstrin G., W., Brocka-Krzemińska, Ż.: *Materiały polimerowe*, PWN, Warszawa 2016.
3. W. Frącz, Wpływ wielokrotnego przetwórstwa polimerów na parametry stanu tworzywa w formie wtryskowej, *Politechnika Rzeszowska*, 2012, *Mechanika* z. 84 (3/12).
4. K. Wilczyński, *Przetwórstwo tworzyw polimerowych*. Praca zbiorowa pod redakcją Krzysztofa Wilczyńskiego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2018.
5. Wilczyński, K.: *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych*, WNT, Warszawa 2001.
6. K. Lewandowski, K. Piszczek, M. Kaczmarek, Reologiczne własności kompozytów polimerowo – drzewnych, *Postępy w inżynierii mechanicznej*, 4(2)/2014, 5-12.
7. D. Plaskota, Właściwości reologiczne jogurtów w zależności od czasu ich dojrzewania, *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2004, 4 (41) S, 88-99.
8. S. Peryt-Stawiarska, H. Murasiewicz, Z. Jaworski, Analiza charakterystyk reologicznych płynu nienewtonowskiego na przykładzie wodnego roztworu soli sodowej karboksymetylocelulozy (CMC), *Inż. Ap. Chem.* 2014, 53, 3, 165-166.
9. S. Zajchowski, J. Tomaszewska, K. Lewandowski, Właściwości mieszanin polimerowych z mączką drzewną, *Biokompozyty z surowców odnawialnych*, pod red. S. Kuciel, H. Rydarowski, Wyd. Politechnika Krakowska, Kraków 2012, s. 134-163
10. Dokumentacja Ansys CFX 21.1
11. K. Wilczyński, Wyznaczanie krzywych lepkości na podstawie ograniczonej liczby pomiarów reometrycznych, *Polimery* 2017, 62, nr 6.
12. A. Kłodziński, T. Sterzyński, Wyznaczanie liczby Reynoldsa w pomiarach reometrycznych, *Zakład Polimerów*, Politechnika Poznańska, 2008.
13. H. Kudela, Optyw walca. Współczynnik siły oporu, Politechnika Wroclawska.

MINIMIZATION OF ENERGY LOSSES IN A CHANNEL WITH VARIABLE SECTION IN THE PROCESSING OF PLASTICS

Abstract

Plastics are widely used all over the world. Due to their low price, ease of forming and other properties, they are widely used in many industries. Polymers, like other materials, have specific physical properties. One of these characteristics is the viscosity which influences the flow nature of the polymer in the liquid state. Six different models of the measuring capillary, which is a component of the capillary rheometer, were tested. The results show that by changing the shape of the measuring element, it is possible to achieve savings in the form of minimizing pressure losses as the polymer flows through the capillary.

Keywords: non-Newtonian fluid, computational fluid dynamics, polymer materials

Łukasz SEMKŁO*
Agnieszka WRÓBLEWSKA*

ANALIZA WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA DLA DROGI STARTOWEJ ORAZ KOŁOWANIA

Parametr określany jako współczynnik tarcia jest jednym z podstawowych parametrów, które odpowiadają za charakterystykę nawierzchni, po której poruszają się pojazdy (samochody, statki powietrzne). Współczynnik tarcia jest bardzo ważny ponieważ odpowiada za bezpieczeństwo i niezawodność nawierzchni. W poniższej pracy przedstawiono ogólne zagadnienia dotyczące siły tarcia, jego wpływ na poruszanie się statków powietrznych po nawierzchniach lotniskowych. Zostały również omówione wymagania z zakresu oceny współczynnika tarcia, które zawarte są w międzynarodowych, jak i polskich dokumentach. Na podstawie wyników badań przeprowadzonych na lotnisku zostały opisane wartości współczynnika tarcia. Sprawdzone również, czy pas startowy i droga kołowania na badanym lotnisku spełniają wymogi odnośnie dopuszczenia do eksploatacji.

Słowa kluczowe: tarcie, droga startowa, droga kołowania, ASFT

1. WPROWADZENIE

W obecnych czasach, gdzie istnieje potrzeba szybkiego i bezpiecznego podróży, lotnictwo odrywa bardzo istotną rolę. Dotyczy to zarówno samego transportu ludzi i towarów jak również w aspekcie wojskowym obrony przestrzeni powietrznych. Natomiast lotnisko jako element infrastruktury krytycznej odgrywa tutaj bardzo istotną rolę.

Według ustawy z dnia 3 lipca 2002 roku dotyczącej prawa lotniczego, lotnisko jest to wydzielony obszar na lądzie, wodzie lub innej powierzchni w całości lub w 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, wpisany do rejestru lotnisk. Bardzo ważną częścią lotniska jest tzw. pole naziemnego ruchu lotniczego

* Politechnika Poznańska

(Movement Area). Obszar ten jest wykorzystywany do startów, lądowań oraz naziemnego ruchu statków powietrznych, obejmujący: pole manewrowe (Maneuvering area) czyli część lotniska wykorzystywana do startów, lądowań i naziemnego ruchu statków powietrznych bez płyt postojowych i zawierająca: drogi kołowania (Taxiway) oraz pas startowy (Runway). W skład pasa startowego wchodzi: droga startowa, pobocze, strefa świateł krawędziowych oraz zjazdy przy wylotach dróg kołowania [3]. Trzeba w tym miejscu wspomnieć, że w polu naziemnego ruchu lotniczego nie poruszają się tylko statki powietrzne, ale także pojazdy pracujące przy technicznej obsłudze lotniska.

Natężenie ruchu w tej części lotniska zależy przede wszystkim od wielkości i funkcji jaką posiada dany port lotniczy. Jednak niezależnie od tego, jaką liczbę statków powietrznych lotnisko przyjmuje, zużyciu ulegają właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni drogi startowej i dróg kołowania, co z czasem może bardzo poważnie wpłynąć na warunki bezpieczeństwa wykonywanych operacji lotniczych.

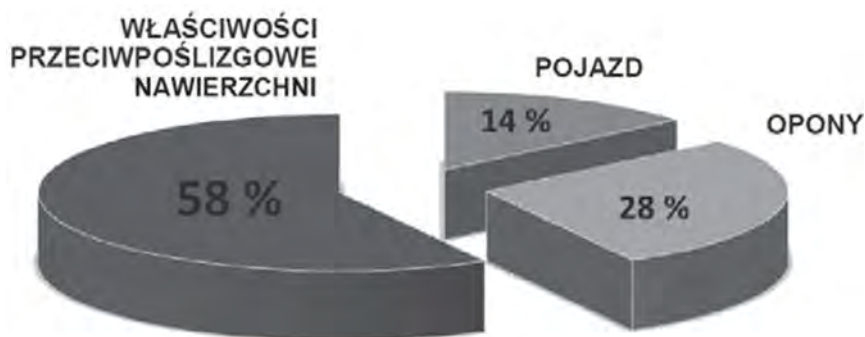
Właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni, które charakteryzowane są współczynnikiem tarcia odgrywają bardzo ważną rolę, ponieważ poprzez zapewnienie jak najlepszych parametrów szorstkości nawierzchni zwiększa się poziom bezpieczeństwa ruchu. W związku z tym tak istotne jest okresowe sprawdzanie współczynnika tarcia na nawierzchniach, po których poruszają się statki powietrzne oraz różnego rodzaju pojazdy.

Dlatego też w niniejszej pracy sprawdzono jak współczynnik tarcia zmieniał się na przestrzeni czasu na wybranych odcinkach nawierzchni.

Przedmiotem pracy jest przedstawienie analizy wyników pomiarów współczynnika tarcia nawierzchni wybranych odcinków na wytypowanych elementach funkcjonalnych lotniska znajdujących się na terenie naszego kraju. W pracy nie podano lokalizacji lotniska, ponieważ zarządca lotniska nie wyraził zgody. Celem pracy jest ocena właściwości badanych nawierzchni pod kątem wartości współczynnika tarcia. Autorzy pracy chcą odpowiedzieć na pytanie czy ewentualna zmiana właściwości nawierzchni w okresie przeprowadzenia pomiarów, nie uległa zmianie na tyle, by zostało naruszone bezpieczeństwo związane z operacjami statków powietrznych, które się po nich poruszają.

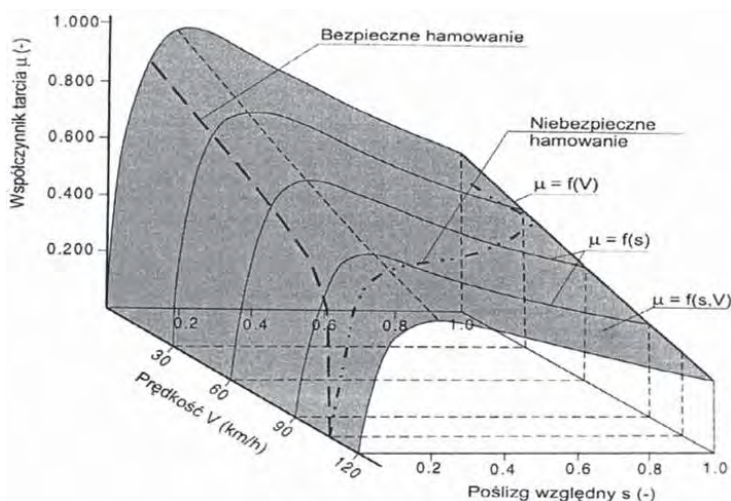
Współczynnik tarcia

Współczynnik tarcia jest to stosunek wypadkowej siły tarcia wytwarzanych między hamowanym kołem urządzenia pomiarowego a nawierzchnią, po której się porusza do nacisku koła na nawierzchnię. Współczynnik tarcia μ jest to podstawowy parametr, który cechuje właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni. Charakteryzują one przyczepność pomiędzy nawierzchnią, a oponą pojazdu. Odgrywa on istotną rolę w procesie zapewnienia bezpieczeństwa ruchu drogowego, wpływając na długość drogi hamowania [Łądkiewicz-Krochmal 2020]. Główne czynniki wpływające na długość drogi hamowania przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Główne czynniki wpływające na długość drogi hamowania [Korzanowski 2017]

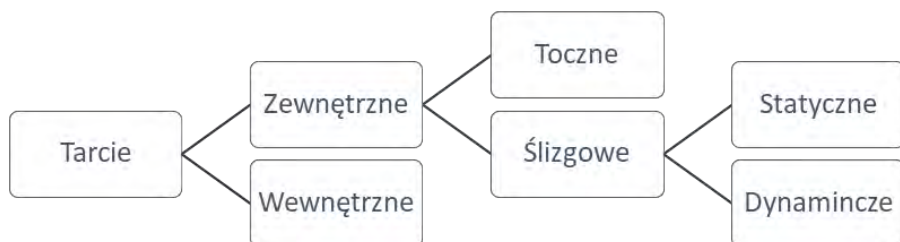
Pomiar szorstkości nawierzchni polega na tym, aby zasymulować wystąpienie warunku poślizgu na mokrej nawierzchni, czyli z punktu widzenia przyczepności kół pojazdów wywołanie najbardziej niekorzystnego zjawiska. Jest to o tyle istotne, że im większy współczynnik tarcia, tym skuteczniejsze hamowanie i krótszy dystans potrzebny do zatrzymania samochodu lub statku powietrznego. Zależność współczynnika tarcia od prędkości i od wielkości (stopnia) poślizgu zilustrowano na rysunku 2.



Rys. 2. Funkcja przestrzenna współczynnika tarcia w zależności od prędkości i od wielkości (stopnia) poślizgu [Sandecki 2017]

Należy zwrócić uwagę na fakt, że współczynnik tarcia to parametr, który charakteryzuje zarówno nawierzchnię jak i oponę pomiarową. Najważniejszym warunkiem tego zjawiska jest to, że powierzchnie obiektów, które się ze sobą stykają nie mogą być idealnie gładkie. W takim przypadku nie było by mowy o przemieszczaniu

sił między stykającymi się ciałami materialnymi. W rzeczywistości taka sytuacja nie ma możliwości zaistnienia, gdyż powierzchnia każdego ciała, nawet jeśli tego nie widać jest chropowata. Chropowatość ta utrudnia ruch obiektów stykających się ze sobą. Występują tu siły tarcia ślizgowego, które związane są z ruchem liniowym pojazdu, jak i siły tarcia tocznego, które z kolei dotyczą ruchu obrotowego koła. Dla poruszającego się statku powietrznego, a konkretniej dla jego kontroli, duże znaczenie ma tarcie ślizgowe, zarówno statyczne jak i dynamiczne. W celu uniknięcia ślizgu koła po nawierzchni, w danej chwili punkt na obwodzie koła, stykający się z powierzchnią nawierzchni lotniskowej, musi pozostawać względem niej w stanie spoczynku. W tym momencie mówimy, że działa siła tarcia ślizgowego statycznego. Tarcie ślizgowe dynamiczne pojawia się natomiast gdy wartości prędkości liniowych na obwodzie koła i jego środka w kierunku wzdłużnym różnią się od siebie [Iwanowski i Wojciechowski 2016]. Na rysunku 3 przedstawiono schemat z podziałem na rodzaje tarcia.



Rys. 3. Podstawowy podział tarcia

Siłą z jaką jedno ciało naciska na drugie oraz współczynnik tarcia są to parametry, które odpowiadają za siłę tarcia. Wzór na maksymalną siłę tarcia wygląda następująco (1):

$$T_{max} = \mu \cdot N \quad (1)$$

gdzie:

- T_{max} maksymalna wartość siły tarcia [N],
 μ wartość współczynnika tarcia,
 N wartość siły nacisku [N].

W chwili gdy maksymalna siła tarcia zostaje przekroczona przez wartość sił zewnętrznych to obiekty między sobą zaczynają się poruszać ruchem jednostajnie przyspieszonym, zgodnie z drugą zasadą dynamiki Newtona. Natomiast gdy siłę tarcia zrównoważymy z siłą zewnętrzną to obiekty będą się względem siebie poruszać ruchem jednostajnym, o czym mówi pierwsza zasada dynamiki Newtona.

W przypadku kiedy dwa ciała materialne pozostają względem siebie nieruchome, współczynnik tarcia jest stały i mówimy wtedy o występowaniu tarcia statycznego. W momencie gdy współczynnik tarcia zmienia się wraz ze zmianą prędkości

kości przemieszczania się obiektów względem siebie mówimy o sile tarcia dynamicznego, którą oblicza się przez zastosowanie wartości współczynnika tarcia zmiennej w funkcji prędkości. Poniżej przedstawiono wzór na siłę tarcia dynamicznego (2):

$$T = \mu \cdot k(v) \cdot N \quad (2)$$

gdzie:

T	wartość siły tarcia [N],
$\mu k(v)$	wartość współczynnika tarcia jako funkcja prędkości względnej między obiektami,
N	wartość siły nacisku jednego obiektu na drugi [N].

Podczas hamowania hamulce pojazdów generują moment hamujący, który przenoszony jest na obwód koła, a to z kolei powoduje powstanie między oponą a nawierzchnią drogi siły hamowania. Gdy chcemy aby samolot zaczął poruszać się ruchem jednostajnie opóźnionym to siła tarcia musi zrównoważyć siły hamowania. W chwili gdy siła tarcia zostanie przewyższona przez siły hamowania koło zostaje wprowadzone w stan poślizgu. Zjawisko to jest to bardzo niebezpieczne, ponieważ w tym momencie pilot może stracić całkowitą kontrolę nad statkiem powietrznym. Dlatego też właśnie dąży się do uzyskania jak największej siły tarcia [Iwanowski i Wojciechowski 2016].

Tekstura nawierzchni i jej wpływ na właściwości przeciwpoślizgowe

Tekstura nawierzchni jest to właściwość, która ma bezpośredni związek z współczynnikiem tarcia. Jest to bardzo ważne zagadnienie, ponieważ właściwości przeciwpoślizgowe nawierzchni w momencie zachodzenia zjawiska tarcia pomiędzy oponą samolotu a podłożem, są od tekstury nawierzchni bardzo zależne [Doc. 9137 ICAO ... 2002]. Wyróżniamy mikroteksturę oraz makroteksturę. W przypadku prawidłowego dobrania tych dwóch parametrów uzyskujemy lepszy wpływ na przyczepność opona-nawierzchnia. Drobne nierówności, których amplituda jest poniżej 0,5 mm nazywamy mikroteksturą. Jest ona odpowiedzialna za przerwanie cienkiego filmu wodnego na mokrej nawierzchni i utworzenie strefy suchego kontaktu na styku opony z nawierzchnią oraz zapewnienie odpowiedniego tarcia pomiędzy kołem a nawierzchnią w wyniku wzajemnego oddziaływania międzycząsteczkowego. Natomiast nierówności, których długość fal znajduje się w zakresie 0,5 mm—50 mm nazywamy makrostrukturą. Nierówności te spowodowane są wystającymi ziarnami kruszywa. Makrostruktura zależy od sposobu jej wbudowania oraz jaki skład materiału został użyty do stworzenia warstwy ścierniczej. Gdy nawierzchnia jest mokra to makrostruktura odpowiada za jej drenaż [Łądkiewicz-Krochmal 2020].

Współczynnik tarcia w dużym stopniu zależy od rodzaju makrostruktury. W przypadku, gdy głębokość nierówności jest taka sama to wtedy można rozróżnić dwa rodzaje makrostruktury: pozytywną i negatywną. Wierzchołki ziaren kruszywa

posiadające ostre zakończenia charakteryzują pozytywny rodzaj makrotekstury. Natomiast tym co charakteryzuje negatywny rodzaj makrotekstury jest to, że wierzchołki kruszywa w nawierzchni mają łagodne zakończenia. Przy tej samej głębokości, makrotekstura ma nieznacznie wyższy współczynnik tarcia i nieco niższą zależność prędkości od współczynnika tarcia niż makrotekstura negatywna [Bukowski 2017]. Makroteksturę nawierzchni standardowo bada się metodą łąty piaskowej którą opisuje zarządzenie numer 34 wydane przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w 2015 roku.

2. METODOLOGIA

Przeprowadzanie operacji lotniczych na nawierzchniach elementów funkcjonalnych lotniska możliwe jest, gdy zachowane jest bezpieczeństwo i niezawodność statków powietrznych oraz wartości współczynnika tarcia korelują z odpowiednimi wymaganiami. Zależności dotyczące współczynnika tarcia opisane zostały w wielu międzynarodowych jak i krajowych przepisach prawa. Poniżej przedstawiono najbardziej istotne przepisy:

- doc. 9137 AN/898 Airport Service Manual part 2-Pavement Surface Conditions wydany przez Międzynarodową Organizację Lotnictwa Cywilnego (International Civil Aviation Organization-ICAO);
- załącznik 14 ICAO do konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym;
- AC 150/5320-12C, wydany przez Federalną Administrację Lotnictwa (Federal Aviation Administration-FAA);
- Polska norma obronna NO-17-A501:2015 Nawierzchnie lotniskowe. Badanie szorstkości.

Pod względem szorstkości nawierzchnię lotniskową, zgodnie z zaleceniami opisanymi w Aneksie nr 14 ICAO, ocenia się według pięciostopniowej skali przedstawionej w tabeli 1.

Tabela 1

Ocena skuteczności hamowania na podstawie wartości współczynnika tarcia
[Złącznik 14 ICAO ... 2013]

Wartość współczynnika tarcia z pomiarów terenowych	Ocena skutecznego hamowania	Cyfra kodu
0,40 i więcej	dobra	5
0,39 – 0,36	średnia do dobrej	4
0,35 – 0,30	średnia	3
0,29 – 0,26	średnia do złej	2
0,25 i mniej	zła	1

Należy podkreślić, że podane powyżej parametry odnoszą się do nawierzch, kiedy trwa tak zwany sezon zimowy, a jej drogi pokryte są ubitym śniegiem i lodem. Ocena „dobra” oznacza, że pilot lądujący na tej nawierzchni nie napotka większych trudności w utrzymaniu kierunku podczas lądowania bądź hamowania [Iwanowski i Wojciechowski 2016]. Należy zwrócić uwagę na fakt, że im ocena jest niższa, tym poruszanie się po nawierzchni staje się coraz bardziej niebezpieczne. W takiej sytuacji konieczne jest wykonanie prac, które umożliwią bezpieczne przeprowadzanie operacji lotniczych.

Załącznik 14 ICAO oraz norma obronna NO-17-A501:2015 wyróżnia dwa graniczne poziomy współczynnika tarcia przy badaniu szorstkości nawierzchni lotniskowych:

- poziom współczynnika tarcia, poniżej którego należy rozpocząć czynności naprawcze;
- minimalny poziom współczynnika tarcia, poniżej którego należy opublikować informację, że zwilżona droga startowa może być śliska.

Według wymagań w wyżej wymienionych dokumentach, współczynnik tarcia dla drogi startowej trzeba podawać ocenie oddzielnie dla każdej 1/3 jej długości. Do celów przekazywania danych służbom informacji lotniczej części te nazwano odpowiednio: A, B oraz C oraz zalecane jest, aby używane nawierzchnie lotniskowe poddawane były okresowym badaniom. Częstotliwość pomiarów współczynnika tarcia należy ustalić na poziomie umożliwiającym identyfikację elementów funkcjonalnych lotniska pod kątem minimalnych wartości współczynnika tarcia w celu podjęcia działań naprawczych. Pomiaru powinny być przeprowadzane zawsze wtedy, gdy zachodzi ryzyko, że nawierzchnia drogi startowej może być niezdatna do użycia ze względu złych warunków atmosferycznych. Ponadto pomiary powinny być przeprowadzane przynajmniej raz na trzy miesiące. Okresowość pomiarów ma także związek z typem statków powietrznych przyjmowanych przez dane lotnisko, rodzajem nawierzchni lotniskowej, warunków atmosferycznych, zasad używania nawierzchni oraz ilości wykonywanych operacji lotniczych [Iwanowski i Wojciechowski 2016].

Podczas przeprowadzania badań współczynnika tarcia dla różnych typów nawierzchni lotniskowych, można zaobserwować, że ich wyniki często różnią się od siebie. Dzieje się tak ponieważ wszystkie badane nawierzchnie lotniskowe różnią się między sobą budową, stanem oraz wiekiem. Na wyniki pomiaru mają wpływ także inne czynniki, takie jak: czystość nawierzchni, ilość podawanej wody, rodzaj zastosowanej opony czy prędkość z jaką poruszał się pojazd. Do prawidłowo przeprowadzonego pomiaru na testowanej nawierzchni lotniskowej nie mogą, a przynajmniej nie powinny znajdować się jakiegokolwiek zanieczyszczenia. Ciało obce, które dostanie się pomiędzy koło pomiarowe a nawierzchnię działa smarująco przez co otrzymany współczynnik tarcia jest zaniżony w stosunku do oczekiwanego. Przykładem może być pył, drobny piasek lub substancja ropopochodna. Natomiast zmiana ilości podawanej wody (wymagany jest film o grubości 1 mm) w trakcie przeprowadzania

pomiaru danej nawierzchni lotniskowej ma wpływ na warunki przeciwpoślizgowe, które w wyniku tego działania ulegają zmianie.

Według polskiej normy obronnej pomiary szorstkości nawierzchni lotniskowych trzeba przeprowadzać urządzeniami, które umożliwiają ciągły pomiar współczynnika tarcia między kołem poruszającego się statku powietrznego a nawierzchnią lotniskową.

Pomiary współczynnika tarcia przeprowadza się za pomocą urządzenia zwanego ASFT (z ang. Airport Surface Friction Tester), które może być zamontowane na przyczepce lub bezpośrednio na pojeździe. Przykład urządzenia ASFT zamontowanego na przyczepce może być ASFT T-10 (Rysunek 4) ciągniętej za pojazdem. Urządzenie ASFT zamontowane na pojeździe przedstawiono na Rysunku 5.



Rys. 4. Przyczepa ASFT T-10 [Wesołowski et al 2018]

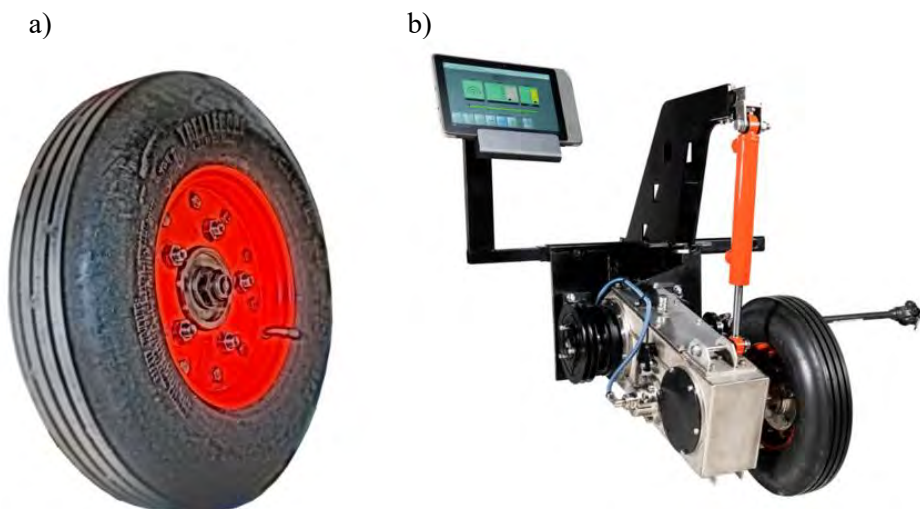


Rys. 5. Urządzenie ASFT CSR [Pożarycki et al. 2019]

Podane prędkości badania właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni są z góry określone. Różne prędkości urządzenia pomiarowego dadzą różne wyniki współczynnika tarcia. Dzieje się tak ponieważ współczynnik tarcia jest zmienny w funkcji prędkości. Wraz ze zmianą prędkości poruszania się obiektów między sobą zmienia się także współczynnik tarcia. Obydwa urządzenia wymienione wyżej umożliwiają ciągły liniowy pomiar współczynnika tarcia pomiędzy nawierzchnią lotniskową, a wzorcowym kołem samolotu z prędkością 65 lub 95 km/h. Posiadają one zbiornik na wodę oraz mechanizm, który pozwala zwilżyć nawierzchnię tak aby uzyskać wymaganą w normach grubość filmu wodnego, która jest nie mniejsza niż 1mm [Wesołowski et al 2018]. Różnorodność urządzeń pomiarowych wiąże się także z zastosowanymi w nich specjalnymi oponami pomiarowymi. Rodzajów opon pomiarowych jest tak dużo, że właściwości każdej z nich mogą między sobą znacząco się różnić. Na wynik pomiaru mogą mieć wpływ następujące cechy charakterystyczne każdej opony:

- wymiary fizyczne,
- obecność i kształt bieżnika,
- twardość i odporność na ścieranie gumy, z której została wykonana,
- ciśnienie robocze wewnątrz gumy, z której została wykonana,
- ciśnienie robocze wewnątrz opony w trakcie pomiarów.

Do wykonania pomiaru używa się najczęściej dwóch rodzajów opon: UNITESTER T520 do badania z filmem wodnym oraz ASTM E1551 do badań bez filmu wodnego (Rysunek 6a). Opony mocowane są na urządzeniu pomiarowym (Rysunek 6b).



Rys. 6. a) Opona pomiarowa Unisester T520; b) urządzenie pomiarowe [źródło: <https://gfte.se/products>]

3. WYNIKI BADAŃ

Pomiar współczynnika tarcia przeprowadzono dla drogi startowej oraz dla drogi kołowania o sztywnej nawierzchni wykonanej z betonu cementowego. Długość sprawdzanego odcinka wynosiła 200 metrów. Stan techniczny wszystkich obiektów, na których przeprowadzono pomiary można ocenić jako bardzo dobry. Współczynnik tarcia nawierzchni zmierzono z podawaniem wody pod koło pomiarowe przy prędkości 95 km/h na wyznaczonych odcinkach. Uzyskane w ten sposób wyniki pomiarów dla pasa startowego przedstawiono w tabeli 2, a dla drogi kołowania w tabeli 3.

Tabela 2

Uzyskane wartości pomiarowe dla drogi startowej przy prędkości 95 km/h oraz z filmem wodnym

Droga startowa		
A	B	C
0,75	0,73	0,76
0,80	0,80	0,82
0,79	0,76	0,78
0,77	0,74	0,76
0,77	0,75	0,77
0,72	0,62	0,77
0,78	0,78	0,81
0,73	0,72	0,75
0,77	0,74	0,75
0,83	0,79	0,82
0,67	0,59	0,68
0,81	0,76	0,82
Wartość średnia pomiarów z tabeli: 0,75		

Wyniki otrzymane z przeprowadzonych badań (Tabela 2) wykazują bardzo dobrą jednorodność i powtarzalność wyników. Pojedyncze wyniki, które zostały uzyskane na poszczególnych odcinkach nie odbiegają od średniej nie więcej niż 0,06. Jednak wśród wartości minimalnych współczynnika tarcia zauważyć można dość duży rozrzut. W tym miejscu trzeba by się zastanowić czy te wartości nie mają charakteru lokalnego i czy należy brać je pod uwagę w analizie właściwości przeciwpoślizgowych. Wartości mieszczą się w przedziale 0,72 - 0,82. Warto się w tym miejscu zastanowić czy pojedynczy wynik 0,59 nie jest błędem, którego warto brać pod uwagę w analizie, ponieważ mógł zostać spowodowany przez nierówność nawierzchni, która z kolei spowodowała podskok koła pomiarowego w tym momencie.

Jednak na tak niski wynik mogło też mieć wpływ jakieś zdarzenie (np. wykruszenie z powodu eksploatacji), a usterka przed następnym pomiarem została naprawiona. Średnia wartość współczynnika na poziomie 0,75 informuje o tym, że pas startowy jest wysoko ponad poziomem wskazanym w przepisach. Zatem pas startowy jest zdalny do ciągłej pracy.

Tabela 3

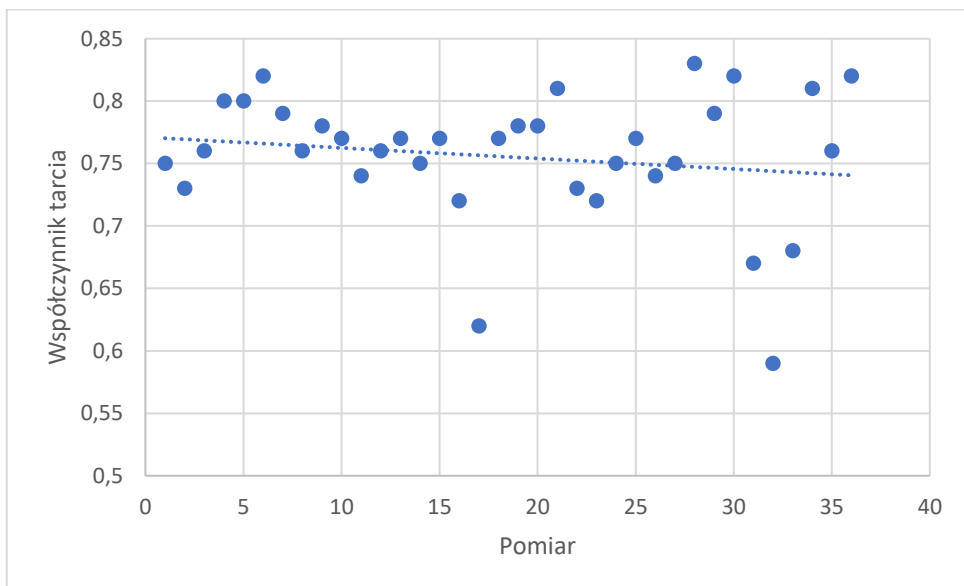
Uzyskane wartości pomiarowe dla drogi kołowania przy prędkości 95 km/h oraz z filmem wodnym

Droga kołowania	
A	B
0,7	0,61
0,63	0,69
0,60	0,66
0,54	0,46
0,53	
0,72	
Wartość średnia pomiarów z tabeli: 0,61	

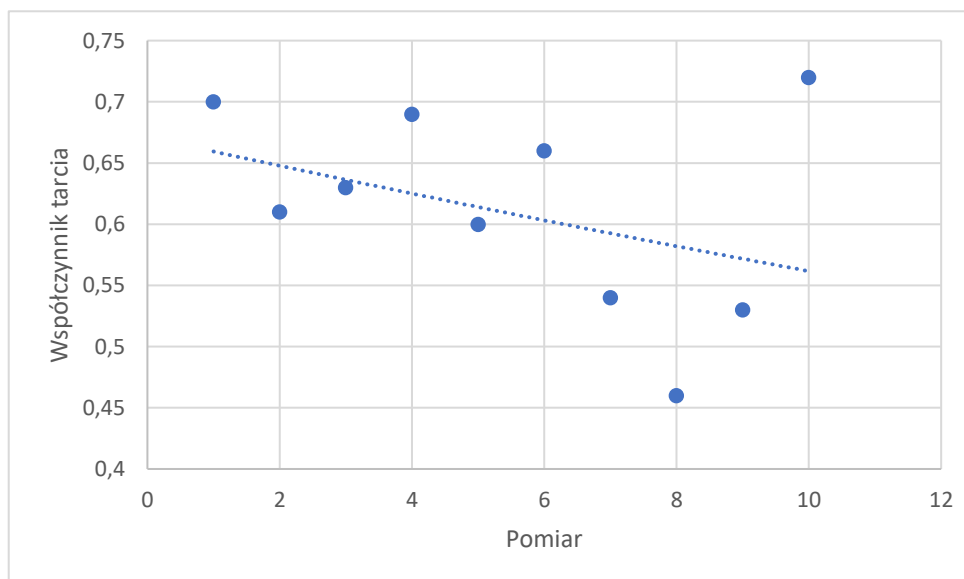
W tabeli 3 przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika tarcia dla drogi kołowania. Wartości jakie zostały otrzymane w rezultacie badań przedstawiają sporą niejednorodność wyników. Pojedyncze wyniki odbiegają znacząco od średniej. Otrzymana średnia na poziomie 0,61 jest znacznie ponad wymaganiami określonymi w przepisach. Jednak jej wartość jest niższa od wartości uzyskanej na pasie startowym, zatem można stwierdzić że droga kołowania jest intensywniej użytkowana niż droga startowa.

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg zmienności współczynnika tarcia wyznaczony dla nawierzchni drogi startowej przy prędkości 95 km/h oraz z filmem wodnym w celu określenia zachowania się współczynnika tarcia na drodze startowej. Tendencja wykazana na wykresie jest spadkowa, zatem pas zużywa się w sposób powolny i kontrolowany.

Na rysunku 8 przedstawiono przebieg zmienności współczynnika tarcia wyznaczony dla nawierzchni drogi kołowania przy prędkości 95 km/h oraz z filmem wodnym. Wykres pokazuje, że współczynnik tarcia na tym odcinku drogi kołowania uległ spadkowi. Spadek współczynnika tarcia na drodze kołowania może być spowodowany tym, że drogi tego typu są rzadziej remontowane, a także ruch na tych drogach jest znacznie większy ponieważ poruszają się po nich poza statkami powietrznymi pojazdy z obsługi technicznej lotniska.



Rys. 7. Przebieg zmienności współczynnika tarcia wyznaczony dla nawierzchni drogi startowej przy prędkości 95 km/h oraz z filmem wodnym



Rys. 8. Przebieg zmienności współczynnika tarcia wyznaczony dla nawierzchni drogi kołowania przy prędkości 95 km/h oraz z filmem wodnym

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań pomiarów współczynnika tarcia, które przeprowadzane zostały na nawierzchniach drogi startowej oraz kołowania na lotnisku znajdującym się na terenie naszego kraju. Badania zaprezentowane w pracy przeprowadzono na nawierzchniach betonowych oraz z podawaną wodą pod koło pomiarowe.

Wyniki tych pomiarów dowiodły, że wartość współczynnika tarcia zmienia się wraz z upływem czasu użytkowania danych nawierzchni lotniskowych. Wyniki współczynnika tarcia z poszczególnych lotnisk mieściły się w normach opisanych w pracy. Oznacza to, że bezpieczeństwo na tych obiektach w tym aspekcie jest zapewnione.

Poza wynikami badań właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni lotniskowych, w pracy opisano także czynniki, które mają wpływ na ów czynnik. Były to między innymi: rodzaj nawierzchni, obecność zanieczyszczeń, ilość podawanej wody w trakcie badania oraz inne. Wszystkie te aspekty mają istotny wpływ na wynik pomiarów. Dlatego też w pracy wyjaśniano dlaczego tak ważne jest przeprowadzanie regularnych badań szorstkości, aby utrzymać na odpowiednim poziomie wartości przeciwpoślizgowych nawierzchni.

LITERATURA

1. Advisory Circular no: 150/5320-12C, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA), 18.03.1997 z późn. zm.
2. Bukowski L., Zagadnienia dotyczące współczynnika tarcia nawierzchni jezdni, *Drogownictwo*, 10, 2017, 337-344
3. <https://dlapilota.pl/wiadomosci/kontrola-ruchu-lotniczego/sprawdz-swoja-wiedze-na-temat-lotnisk-i-ich-elementow>
4. Doc. 9137 ICAO AN/898 Airport Service Manual Part 2 - Pavement Surface Conditions, ICAO, Fourth Edition, 2002
5. Pożarycki A., Wesołowski M., Moralewski T. Badania właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni urządzeniami do testów w trybie ciągłym, *Drogownictwo* 9/2019
6. Iwanowski P., Wojciechowski M., Interpretacja właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni drogowych i lotniskowych na podstawie pomiaru współczynnika tarcia, *Autobusy* 12/2017.
7. Iwanowski P., Wojciechowski M., Charakterystyka tarcia nawierzchni lotniskowych w aspekcie bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych, *Autobusy* 12/2016.

8. Korzanowski G., Wpływ kruszyw na właściwości przeciwpoślizgowe i hałaśliwość nawierzchni, Polski Kongres Drogowy, Warszawa, 2017.
9. Łądkiewicz-Krochmal K., Współczynnik tarcia nawierzchni – analiza zagadnień, urządzenia pomiarowe, Drogownictwo 2/2020.
10. Nita P., Budowa i utrzymanie nawierzchni lotniskowych, WKŁ, Warszawa 2008r.
11. NO-17-A501:2015 Nawierzchnie lotniskowe. Badanie szorstkości.
12. Sandecki M., Kształtowanie ramp na drogach dwujezdniowych, Drogownictwo, 2, 2017, 52-59.
13. Wesołowski M., Błacha K., Kowalewska A., Iwanowski P., Ocena właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni lotniskowych z wykorzystaniem urządzeń do ciągłego pomiaru współczynnika tarcia, Przegląd Komunikacyjny 12/2018.
14. Załącznik 14 ICAO do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, Lotniska Tom I - Projektowanie i eksploatacja lotnisk, wydanie 6, lipiec 2013.
15. Załącznik do Zarządzenia Nr 34 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 30.04.2015 roku, Diagnostyka stanu nawierzchni i jej elementów. Wytyczne stosowania, Warszawa 2015.

ANALYSIS OF THE FRICTION COEFFICIENT ON THE RUNWAY AND TAXIWAY

Abstract

The parameter defined as the coefficient of friction is one of the basic parameters that are responsible for the characteristics of the road surface on which vehicles (cars, aircraft) travel. The coefficient of friction is very important because it is responsible for the safety and reliability of the pavement. The paper below presents general issues concerning the friction force and its influence on the movement of aircraft on airport pavements. The requirements for the assessment of the friction coefficient, which are contained in international and Polish documents, were also discussed. Based on the results of tests carried out at the airport, the values of the friction coefficient have been described. It was also checked whether the runway and taxiway at the tested airport meet the requirements for the admittance to use.

Keywords: friction, runway, taxiway, ASFT

Łukasz SEMKŁO*

ZAGROŻENIA I NORMY ZWIĄZANE Z WODOREM

W pracy przedstawiono zagrożenia jakie mogą powstać podczas użytkowania zarówno wodoru w postaci ciekłej jak i gazowej. Podano podstawowe dane odnośnie właściwości fizycznych wodoru. Przedstawiono przykładowe normy jakie są stosowane w Polsce i na świecie w celu zapewnienia bezpieczeństwa podczas użytkowania wodoru.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, normy, wodór ciekły, wodór

1. WPROWADZENIE

W celu ograniczenia gazów cieplarnianych podjęto szereg kroków takich jak protokół z Kioto z 2005 roku oraz Porozumienie Paryskie z 2015 roku. Postanowiono ograniczyć zmiany klimatyczne poprzez wyhamowanie wzrostu średniej temperatury planety poniżej 2°C. Pod wpływem uzgodnień międzynarodowych zobligowano się do zmniejszenia zużycia paliw kopalnianych, a zwiększenia wykorzystania energii odnawialnych [Mikul 2021]. Japonia oraz Chiny mają osiągnąć neutralność energetyczną odpowiednio do 2050 i 2060 roku. Cały świat posiada silną motywację do tego aby przeprowadzić transformację energetyczną polegającą na dekarbonizacji gospodarki. Należy pamiętać o tym, że mimo wszelkich wysiłków transformacja energetyczna wiąże się z rozwojem technologii magazynowania energii wytworzonej przez odnawialne źródła energii oraz z potrzebą niwelowania wahań w sieci elektroenergetycznej [Aziz 2021].

Przykładem paliwa umożliwiającemu przyspieszenie procesu dekarbonizacji jest wodór. Wodór to jeden z kierunków działań w transformacji energetycznej dzięki temu, że jest pierwiastkiem najobficiej występującym na Ziemi, chociaż jest naturalnie dostępny w stanie utlenionym (woda). Wodór może być wytwarzany poprzez różne technologie konwersji, w tym termochemiczne i elektrochemiczne. Ponadto wodór jest konwertowalny do innych wtórnych źródeł energii takich jak: energia elektryczna

* Instytut Energetyki Ciepłej, Politechnika Poznańska

i ciepło. Wykorzystanie wodoru obejmuje szeroki zakres zastosowania technologicznego w silnikach spalinowych, czy w ogniach paliwowych [Lata i Misra 2010, Juste 2006]. Oczekuje się, że masowe wdrożenie wodoru w przyszłości doprowadzi do powstania gospodarki wodorowej, która może być konkurencyjna ekonomicznie. Wodór może być wykorzystywany zarówno w postaci gazowej jak i ciekłej.

2. CHARAKTERYSTYKA WODORU

Wodór chemicznie jest najprostszą substancją, ponieważ składa się z jednego protonu i jednego elektronu. Jest nietoksyczny, bezbarwny i bezzapachowy. Cząsteczka wodoru jest niezwykle mała, jej promień to 120 pm. Jest 14 razy lżejszy od powietrza i ma wysoką szybkość dyfuzji [Kovac, Paranos i Marcus 2021]. Bombardowany neutronami wodór prowadzi do powstania izotopów, w tym deuteru i trytu, które są radioaktywne i są wykorzystywane w wielu urządzeniach jądrowych [Mazloomi i Gomes 2012]. Temperatura zapłonu przy której paliwo wytwarza wystarczającą ilość oparów, aby powstała mieszanka paliwowa wynosi -231°C , czyli jest to wartość niższa w porównaniu do innych paliw. Temperatura zapłonu wskazuje, iż wodór bardzo łatwo się spala, a jest to korzystne ze względu na możliwość użycia prostszego układu zapłonowego [Verhelst i Wallner 2009]. W tabeli 1 wymieniono właściwości fizyczne wodoru.

Tabela 1

Właściwości fizyczne wodoru [źródło: <https://ecoprius.pl>]

Nazwa	Wartość
Wartość opałowa [MJ/m^3]	10,82
Wartość opałowa [kWh/m^3]	3,00
Gęstość w warunkach standardowych [kg/m^3]	0,09
Temperatura spalania [$^{\circ}\text{C}$]	2 522
Prędkość płomienia (laminarna) [m/s]	2,81
Zapotrzebowanie na powietrze [$\text{m}^3_{\text{powietrze}}/\text{m}^3_{\text{paliwo}}$]	2,38
Zawartość wody w spalinach przy $\lambda = 1$ [udział w %]	35

W zależności od metody produkcji wódór jest jedynym paliwem, które określa się przy pomocy schematów kolorystycznych [22]:

- szary - wytwarzany głównie z gazu ziemnego w procesie reformingu metanu parą wodną (SMR)
- niebieski - powstaje z wychwytem związków węgla
- niebiesko-zielony - wytwarza się go poprzez SMR, ale z użyciem bio-surowców
- zielony - wytwarzany przy użyciu elektrolizy wody i energii ze źródeł odnawialnych.

3. ZAGROŻENIA ZWIĄZANE Z WODOREM

W 1766 poraz pierwszy sztucznie wyprodukowano wodór, a co za tym idzie od tamtego czasu powstały standardy i przepisy dotyczące obsługi oraz zarządzania na całym świecie. Ogólnie przyjmuje się, że wodór jest tak samo niebezpieczny jak inne paliwa mimo iż jest wysoce łatwopalny i ma bardzo szeroki zakres palności [Abdelaal et al. 2005].

Szeroko rozumiane bezpieczeństwo wodorowe, w tym zapobieganie i łagodzenie zagrożeń oraz sposoby radzenia sobie z zagrożeniem w momencie jego wystąpienia stają się kluczową kwestią dla zwiększenia akceptacji społecznej dla wodoru. Zagrożenia związane z wodorem można podzielić na [Najjar 2013]:

- fizyczne (kruchość, awarie i zmiana fazy)
- fizjologiczne (odmrożenia, hipotermia, uduszenie i problemy z oddychaniem)
- chemiczne (pożar, wybuch).

Wyzwanie w zakresie bezpieczeństwa wodoru wynika z jego cech, w tym podatności na nieszczelność, niska energia zapłonu oraz szeroki zakres stosunków paliwowo-tlenowych do spalania, pływalność i kruchość [Ramamurthi, Bhadraiah i Murthy 2009, Houf et al. 2010]. Wodór ma wysoką temperaturę samozapłonu (temperatura, w której paliwo zapala się bez zewnętrznego źródła zapłonu) i wynosi ona 585°C. Z punktu widzenia bezpieczeństwa wysoki samozapłon wskazuje, że jest bezpieczny. Jednak energia potrzebna do początkowego zapłonu wodoru jest bardzo niska w porównaniu z innymi paliwami. Ponadto wodór również ma wyjątkowo niski współczynnik przewodności elektrycznej, co oznacza, że zarówno przepływ jak i mieszanie wodoru może generować ładunek elektrostatyczny, który może wywołać iskrę. Wyeliminowanie potencjalnego zapłonu i źródła ciepła (takie jak elektryczność statyczna, gorące przedmioty, otwarty ogień i sprzęt elektryczny) oraz uziemienie elektryczne urządzeń pracujących z wodorem jest bardzo ważne. Podczas spalania wodór ma prawie niewidoczny, bładoniebieski kolor, co utrudnia jego wykrycie, stąd wymagane jest bardzo ostrożne obchodzenie się z wodorem podczas zapłonu i spalania. Płomień wodoru ma zwykle postać pochodni. Szybkość wytrącania się pary z cieczy w wodorze jest znacznie większa w porównaniu do dowolnego innego paliwa kopalnego, co powoduje bardzo krótki okres pożaru wodoru [Zuttel et al. 2010]. Podczas spalania wytwarzana jest woda, wdychanie dymu ze spalania wodoru jest bezpieczne, bez ryzyka uduszenia się dymem. Należy pamiętać, że wodór jest stosunkowo wrażliwy na detonację, co wymaga stosowania zwiększonej liczby środków odnośnie bezpieczeństwa podczas jego przechowywania [Deluchi 1989].

Wodór ciekły w porównaniu z wodorem w postaci gazowej ma ekstremalnie niską temperaturę wrzenia i wynosi ona -253°C przy ciśnieniu 1 bar. Bezpośredni kontakt z ciekłym wodorem i zimnym gazem powstałym podczas przemiany fazowej prowadzi do poważnych oparzeń. Oparzenia te są podobne do oparzeń termicznych, w tym

odmrożenia i hipotermia. Ponadto wdychanie zimnych oparów wodorowych może powodować dolegliwości związane z oddychaniem, a nawet może prowadzić do uduszenia [Kovac, Paranos i Marcius 2021]. Wyciek ciekłego wodoru prowadzi do wytworzenia atmosfery bogatej w wodór, a stan taki jest uważany za bardzo niebezpieczny. Detonacja wywołana poprzez opary ciekłego wodoru uwalnia większą ilość energii niż w przypadku wodoru w postaci gazowej.

Odparowujący ciekły wodór, który rozprasza się do stanu gazowego ma inne właściwości od wodoru gazowego, szczególnie bezpośrednio po odparowaniu. Ten odparowujący wodór ma bardzo niską temperaturę i większą gęstość (większą niż powietrze) i dlatego gromadzi się przy gruncie [Pritchard, Rattigan i Hazards 2010]. Natychmiastowy kontakt zimnego wodoru z gorącą cieczą prowadzi do wybuchu gwałtownej przemiany fazowej [Verfonden i Dienhart 1997].

Ze względu na większą gęstość wodoru w postaci ciekłej niż powietrze, uwalnianie się ciekłego wodoru jest znacznie wolniejsze i trwa dłużej, a co za tym idzie potrzebuje więcej czasu na całkowite rozproszenie się w atmosferze. Ekstremalnie niskie temperatury ciekłego wodoru wymagają bardzo dobrze zaprojektowanego zbiornika i urządzeń zabezpieczających, w tym materiały oraz konstrukcje stosowane do przechowywania i transportowania.

4. NORMY DOTYCZĄCE WODORU

W celu unormowania przepisów oraz zwiększenia świadomości związanych z bezpieczeństwem wodoru przyjęto przepisy i normy dla wodoru wykorzystywanego zarówno w warunkach gazowych jak i ciekłych. Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ISO) wydała kilka wytycznych dotyczących wykorzystania wodoru. Komitet Techniczny (TC) 197 jest dedykowany do opracowywania norm związanych z systemami i urządzeniami stosowanymi do produkcji, przechowywania, transportowania i dokonywania pomiarów odnośnie wodoru. ISO/TR 15916:2004 została ustanowiona w celu określenia wytycznych dotyczących wykorzystania wodoru zarówno w postaci gazowej, jak i płynnej. Obejmuje podstawowe kwestie dotyczące bezpieczeństwa, podstawowe właściwości wodoru i zagrożenia. Ponadto ISO 13984:1999 i ISO 13985:2006 zostały wydane w celu zapewnienia wskazówek dotyczących dozowania ciekłego wodoru do pojazdów i specyfikacje wymagane dla zbiorników ciekłego paliwa wodorowego. Przepisy określają również bezpieczną odległość jaka musi zostać zachowana pomiędzy źródłem zagrożenia oraz obiektem, w tym ludźmi, który może ulec zniszczeniu. Europejskie Stowarzyszenie Gazów Przemysłowych (EIGA) zaleciło kilka minimalnych odległości bezpiecznych podczas korzystania z ciekłego wodoru w zależności od zastosowania [Liu et al. 2021]. Według do tego wykazu odległości bezpieczne dla instalacji ciekłego wodoru instalowanych w przestrzeniach publicznych to 60 metrów, w pobliżu budynków to 20 metrów [EIGA ... 2019]. Bezpieczną odległość można zmniejszyć, stosując środki bezpieczeństwa takie jak zraszacze z wodą (ograniczenie wpływu

promieniowania ciepłego) i gradzie chroniące przed wybuchem. EIGA również zaleca, aby zbiorniki do przechowywania ciekłego wodoru nie były instalowane wewnątrz budynków, natomiast składowanie podziemne wymaga spełnienia dodatkowych wymagań. Zaleca się również aby rury i armatura, ze względu na obecność amoniaku i chloru jako zanieczyszczeń, wykonane z miedzi i stopów miedzi, cyny, cynku nie powinny być stosowane z powodu reakcji pomiędzy płynem a materiałami.

Przepisy dotyczące postępowania z wodorem zarówno ciekłym jak i gazowym oraz przepisy dotyczące infrastruktury towarzyszącej zostały określone indywidualnie w różnych krajach. W Wielkiej Brytanii w 2002 roku wprowadzono przepisy DSEAR (The Dangerous Substances and Explosive Atmospheres Regulations). Przepisy te obejmuje środki mające na celu złagodzenie i zapobieganie występowaniu niebezpiecznego stężenia palnych gazów i cieczy [Pritchard, Rattigan i Hazards 2010]. W Stanach Zjednoczonych Narodowe Laboratorium Energii Odnawialnej (NREL) wydało przewodnik po technologiach, podsumowujący różne kodeksy i normy, w tym opisuje wykorzystanie ciekłego wodoru [Rivikin, Burgess i Buttner 2015]. Chiny wydały kilka norm dotyczących przechowywania i transportu wodoru. GB/T 34583 [Chinese standard ... 2017] i GB/T 29729 [Chinese standard ... 2013] to normy związane z bezpieczeństwem i magazynowaniem wodoru, zwłaszcza na stacjach paliw.

W Polsce regulacje dotyczące wodoru określone są w aktach prawnych opartych na polskich normach. Przykładowe normy związane z wodorem to:

- ISO 19880-1:2020 – norma określająca minimalne wymagania dotyczące projektowania, instalacji, rozruchu, eksploatacji, kontroli i konserwacji, mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa oraz w stosownych przypadkach, wydajności publicznych i niepublicznych stacji paliw zaopatrujących lekkie pojazdy drogowe (np. pojazdy elektryczne wyposażone w ogniwa paliwowe) w wodór gazowy;
- PN-EN 17127:2021-04 – zewnętrzne punkty tankowania wodoru dystrybuujące gazowy wodór i stosowane procedury tankowania;
- norma ISO 17268 – norma dotycząca urządzeń podłączających i służących do tankowania wodoru w stanie gazowym w pojazdach silnikowych;
- norma ISO 22734-1 – norma określająca konstrukcję, wymogi bezpieczeństwa i wymagania eksploatacyjne dla urządzeń do wytwarzania wodoru za pomocą elektrolizy wody;
- norma SAE J2600 – norma dotycząca projektowania i badania dysz, złączy i zbiorników do tankowania sprężonym wodorem;
- norma SAE J2579 – norma określająca wymogi dla zbiorników przechowujących wodór;
- norma ISO/TS 20100/, norma ISO 19880-1:2020 – normy określające charakterystykę zewnętrznych publicznych i niepublicznych stacji paliwowych, które wydają wodór gazowy stosowany jako paliwo do pojazdów lądowych wszystkich typów, nie obejmują zastosowań domowych i przydomowych do zasilania pojazdów lądowych.

4. WNIOSKI

Jako paliwo alternatywne zmniejszające ilość szkodliwych substancji oddawanych do atmosfery wodór jest również bardzo niebezpieczny. Może on prowadzić do różnych zagrożeń takich jak detonacje, czy oparzenia. Mimo swoich wad jest to alternatywne źródło, które może spełnić światowe zapotrzebowanie na paliwo. Należy nauczyć się z nim obchodzić a powstające normy i przepisy to ułatwiają. Wodór jest dobrze przebadanym pierwiastkiem pod kątem spalania i zachowania procedur bezpieczeństwa. W przypadku budowy rynku wodorowego, który będzie wchodził w skład tak zwanej infrastruktury krytycznej należy wykorzystać jego wszystkie pozytywne aspekty.

LITERATURA

1. Aziz M. Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety, *Energies* 2021, 14 (18), 5917;
2. Mikul, H. Energy transition and the role of system integration of the energy, water and environmental systems. *J. Clean. Prod.* 2021, 292, 126027.
3. Lata, D.; Misra, A. Theoretical and experimental investigations on the performance of dual fuel diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010, 35, 11918–11931.
4. Juste, G.L. Hydrogen injection as additional fuel in gas turbine combustor. Evaluation of effects. *Int. J. Hydrogen Energy* 2006, 31, 2112–2121.
5. Kovač, A.; Paranos, M.; Marciuš, D. Hydrogen in energy transition: A review. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021, 46, 10016–10035.
6. Mazloomi, K.; Gomes, C. Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, 16, 3024–3033.
7. Verhelst, S., Wallner, T. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2009, 35, 490–527.
8. Najjar, Y.S. Hydrogen safety: The road toward green technology. *Int. J. Hydrogen Energy* 2013, 38, 10716–10728.
9. Pritchard, D.K.; Rattigan, W.M. *Hazards of Liquid Hydrogen*; Health Safety Executive: Buxton, UK, 2010.
10. Abdelaal, H.; Sadik, M.; Bassyouni, M.; Shalabi, M. A new approach to utilize Hydrogen as a safe fuel. *Int. J. Hydrogen Energy* 2005, 30, 1511–1514.
11. Ramamurthi, K.; Bhadraiah, K.; Murthy, S.S. Formation of flammable hydrogen–air clouds from hydrogen leakage. *Int. J. Hydrogen Energy* 2009, 34, 8428–8437.
12. Houf, W.; Schefer, R.; Evans, G.; Merilo, E.; Groethe, M. Evaluation of barrier walls for mitigation of unintended releases of hydrogen. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010, 35, 4758–4775.
13. Züttel, A.; Remhof, A.; Borgschulte, A.; Friedrichs, O. Hydrogen: The future energy carrier. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2010, 368, 3329–3342.
14. Deluchi, M. Hydrogen vehicles: An evaluation of fuel storage, performance, safety, environmental impacts, and cost. *Int. J. Hydrogen Energy* 1989, 14, 81–130.

15. Hansen, O.R. Hydrogen infrastructure—Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions. *Process. Saf. Environ. Prot.* 2020, 143, 164–176.
16. Verfondern, K.; Dienhart, B. Experimental and theoretical investigation of liquid hydrogen pool spreading and vaporization. *Int. J. Hydrogen Energy* 1997, 22, 649–660.
17. Liu, Y.; Liu, Z.; Wei, J.; Lan, Y.; Yang, S.; Jin, T. Evaluation and prediction of the safe distance in liquid hydrogen spill accident. *Process. Saf. Environ. Prot.* 2021, 146, 1–8.
18. EIGA. Safety in Storage, Handling and Distribution; EIGA: Brussels, Belgium, 2019; p. 24.
19. Rivkin, C.; Burgess, R.; Büttner, W. Hydrogen Technologies Safety Guide; Office of Scientific and Technical Information (OSTI): Oak Ridge, TN, USA, 2015; p. 67.
20. Chinese Standard GB/T 34583-2017 (GBT 34583-2017)
21. Chinese Standard GB/T 29729-2013 (GB/T29729-2013)
22. <https://new.abb.com/process-automation/pl/energy-industries/abb-wodor/dlaczego-wodor> (dostęp 5 maj 2022r.)

RISKS AND STANDARDS RELATED TO HYDROGEN

Abstract

The paper presents the risks that may arise during the use of both liquid and gaseous hydrogen. Basic data on the visual properties of hydrogen are given. Examples of standards that are used in Poland and around the world to ensure safety during the use of hydrogen are presented.

Keywords: safety, standards, liquid hydrogen, hydrogen

Piotr W. SIELICKI*

WYBRANE ZAŁOŻENIA PROJEKTOWANIA INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ PODCZAS OBCIĄŻEŃ WYBUCHOWYCH

W pracy zawarto wybrane zagadnienia związane z realizacją projektów naukowo-badawczych oraz zadań realizowanych w Instytucie Analizy Konstrukcji Politechniki Poznańskiej związanych z bezpieczeństwem infrastruktury krytycznej państwa. W szczególności omówiono podstawy procesu oceny ryzyka oraz analizy kosztowo-jakościowej planowanych działań. Jako wartość dodaną opisano proces projektowania i wzmocnienia kluczowego elementu konstrukcyjnego na przykładzie jednowarstwowej ściany murowanej. W ramach uzupełnienia przytoczono również wybrane kryteria oceny zagrożenia / bezpieczeństwa dla życia ludzkiego w oparciu o funkcję bazującą na obciążeniu falą podmuchową powstałą w wyniku wybuchu.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, infrastruktura krytyczna, obciążenie wybuchem, kryteria przeżycia, ryzyko

1. WPROWADZENIE

Współczesne społeczeństwa niezależnie od etapów własnego rozwoju, na którym się znajdują są zobowiązane do współistnienia w ramach ogólnie przyjętego porządku. Porządek ten określają zasady wzajemnych relacjach między innymi z sąsiadami oraz z innymi grupami społecznymi. Taka norma panuje od czasu, kiedy na ziemi pojawiły się pierwsze istoty rozumne. Należy również podkreślić, że natura ludzka wymaga, aby zapewniać w miarę możliwości ciągły rozwój własnej cywilizacji. Nie jest to jednak zawsze możliwe i zdarza się, że ten ów rozwój jest hamowany przez incydentalne wydarzenia. Niewątpliwie można je podzielić na dwie grupy tj. incydentalne zdarzenia o charakterze naturalnym oraz zdarzenia spowodowane działaniami ludzkimi. O ile do tych pierwszych łatwo możemy zaliczyć trzęsienia ziemi, powodzie, susze, itp. to

* Politechnika Poznańska.

definiowanie drugich jest jednoznacznie sprowokowane, np.: działanie wojenne. Występowanie każdego z powyższych zagrożeń jest istotne dla poczucia bezpieczeństwa ludzi, których ochrona powinna być zawsze najwyższym priorytetem państwa. Między innymi w tym celu sformułowano pojęcie infrastruktura krytyczna, które trafnie obejmuje najistotniejsze elementy konieczne do zapewnienia wspomnianej ochrony. Zwrot ten jest nieodłącznie powiązany z anglojęzycznymi pojęciami takimi jak: *critical infrastructure protection (CIP)*, *structure resilience*, *critical infrastructure*.

Już od czasów starożytnych krytyczne elementy infrastruktury były szczególnie chronione a zapewnienie ciągłości ich działania stanowiło priorytet dla władców. Historia ukazuje liczne przykłady metodologii zapewnienia bezpieczeństwa i ciągłości pracy takich elementów jak na przykład rzymskie akwedukty, młyny wiatrowe, spichlerze czy też zaopatrzenie w wodę lokalnych dostawców żywności [Sielicki 2021]. Są to oczywiście zaledwie wybrane obiekty a tuż obok nich znajdują się inne strategiczne budowle jak na przykład mury i fortyfikacje obronne.

Obecnie w ramach powszechnie przyjętego umownego porządku oraz ekonomicznej pozornej stabilności wygoda i komfort życia społeczeństwa często pozwalają zapomnieć o warunkach brzegowych utrzymujących wspomnianą wcześniej równowagę. W tym momencie rolą władcy (czyt. państwa), pośród różnych innych obowiązków względem obywateli, jest odpowiedzialne zapewnienie bezpieczeństwa własnemu społeczeństwu. Można tu wymienić m.in. stabilność systemów dostaw krytycznych surowców, wody pitnej, paliwa, energii jak i wszystkie inne konieczne do ochrony życia ludzkiego oraz zapewnianiające jego przetrwanie. Tak szeroko określone bezpieczeństwo jest często reprezentowane przez zapewnienie przysłowiowego „dachu nad głową”. Co we współczesnym rozumieniu określają rozmaite konstrukcje i rozwiązania inżynierskie.

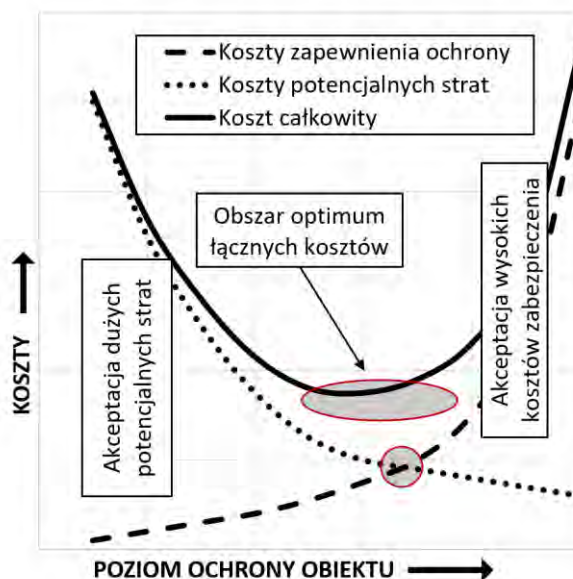
Na podstawie prowadzonych w ostatnich latach prac w Instytucie Analizy Konstrukcji (dawniej Instytut Konstrukcji Budowlanych) Politechniki Poznańskiej określono szereg zasad i wytycznych, które powinny być spełnione podczas projektowania tych konstrukcji. Ograniczenia istniejących przepisów nie pozwalają dokładnie oszacować takich wyjątkowych obciążeń jak na przykład wybuch, oddziaływanie szybkich fal ciśnienia i temperatury czy też uderzenia nieregularnych odłamków poruszających się znacznie szybciej niż prędkość dźwięku. W trakcie zrealizowanych projektów naukowo-badawczych oraz prowadzenia autorskich badań wyznaczono szereg parametrów stanowiących podstawę do określania wspomnianych wcześniej obciążeń na konstrukcje budowlane oraz na organizm ludzki. Incydentalne zdarzenia tj. uderzenia samolotów w budynki tuż obok tych bezpośrednio związanych z działaniami wojennymi pokazują, że ochrona eksponowanych obiektów infrastruktury krytycznej jest nieustannie tematem aktualnym i ważnym dla wszystkich państw.

Intensyfikacja rozwoju nowej infrastruktury, związanej z branżą energetyczną, takiej jak przykładowo małe elektrownie atomowe SMR (ang. *small module reactor*), morskie farmy wiatrowe, magazyny paliw, lotniska, centra dowodzenia, linie kolejowe wymusza interdyscyplinarne podejście do procesu projektowania, eksploatacji, a w szczególności długotrwałej ochrony tych obiektów infrastruktury krytycznej. Ich

odporność na zagrożenie jest kluczową składową świadczącą o bezpieczeństwie państwa i społeczeństwa.

2. ANALIZA RYZYKA I KOSZTÓW

Realizacja procesu ochrony infrastruktury krytycznej jest zawsze związana z intensyfikacją kosztów. Dotyczy to wielu płaszczyzn, w tym także wzmocnienia indywidualnych elementów konstrukcyjnych jak całego obiektu budowlanego. Należy zwrócić uwagę, że również materiał odgrywa tu istotną rolę. Przykładowo zwiększenie o 100% odporności na wybuch ściany murowanej może równocześnie wywołać efekt konieczności poniesienia 500% zakładanych pierwotnie kosztów jej wybudowania. Natomiast zastosowanie tej samej ściany wykonanej w technologii żelbetowej, przy początkowej cenie dwukrotnie przewyższającej koszt pierwotnej ściany murowanej będzie skutkowało poniesieniem kosztów o „zaledwie” 100% jej wstępnego wykonania przy zachowaniu dwukrotnie wyższej odporności. Tego rodzaju tok rozumowania można łatwo przełożyć na globalne rozwiązania wszystkich obiektów inżynierskich. Tym samym, zawsze wstępna analiza będzie się odbywała w dwupłaszczyznowej przestrzeni kosztowej. Będą analizowane możliwe do wystąpienia straty względem koniecznych do poniesienia nakładów na zwiększenie wytrzymałości. Tego rodzaju zależność przedstawiono na Rys.1.



Rys. 1. Koszty ochrony i możliwych do zaakceptowania strat względem stopienia ochrony

Znalezienie optymalnego punktu przecięcia krzywych na powyższym wykresie, tym samym rozsądnego do realizacji poziomu ochrony jest zależne od indywidualnej filozofii realizacji zadania i przyjętych norm prawnych oraz społecznych. Kluczowym elementem prowadzenia takich rozważań jest zawsze analiza ryzyka, którą w najprostszej formie określa iloczyn trzech czynników. Im iloczyn jest bliższy jedności (1=100%) tym ryzyko jest większe (1). Do tej oceny zaliczają się składowe: *zagrożenie*, *efekt*, *wrażliwość*, np. *wrażliwość konstrukcji*.

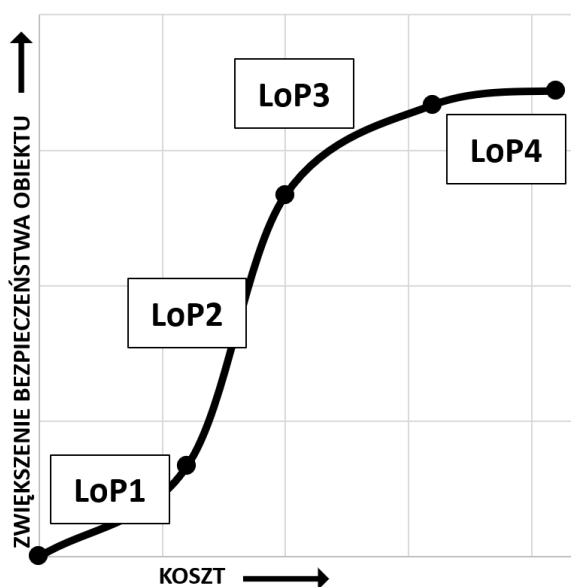
$$\text{Ryzyko} = \text{Zagrożenie} \times \text{Efekt} \times \text{Wrażliwość} \quad (1)$$

O ile zagrożeniem dla życia osoby przebywającej wewnątrz pomieszczenia może być rzut kamieniem w szybę okna, dla którego zaproponowana wartość pierwszej składowej wynosi 0.1 to już wykorzystanie materiału wybuchowego będzie równoważne wartości 1.0. Idąc dalej tym tokiem rozumowania efekt dla pierwszego przypadku może być znikomy. Pęknięcie tafli szklanej, nie spowoduje zranienia osób przebywających po drugiej jego stronie co pozwoli przyjąć wartość 0.1. Jednak, wykorzystanie wysokoenergetycznego ładunku wybuchowego powodującego finalnie propagację odłamków kilkanaście metrów wewnątrz obiektu wymusza przyjęcie 1.0 jako efekt. Ostatni z parametrów jest ściśle związany z odpornością konstrukcji. *Wrażliwość*, którą trafnie oddaje angielskie sformułowanie *vulnerability*, tłumaczone jako podatność na uszkodzenia, jest tym niższa im konstrukcja jest mocniejsza. Jeżeli szyba jest zbrojona, o specjalnie projektowanej odporności dla ww. przypadku można przyjąć wartość 0.1. Analogicznie zakładamy wartość 1.0 gdy jest to szkło o standardowej wytrzymałości [Sielicki, Pludra i Przybylski 2019; Sielicki, Zhang i Bedon 2020].

Finalnie możemy mówić o pewnej płynności podczas estymacji założeń projektowych przed jak i w trakcie wykonywania obiektów (elementów) infrastruktury krytycznej. Doświadczenie osób pełniących funkcję doradcą odgrywa tu niebagatelną rolę, o ile chcemy znaleźć się w optymalnym miejscu zgodnie z Rys.1. Racjonalne przyjmowanie wspomnianych miar ochrony ma szansę skutkować znacznym przyrostem skuteczności prowadzonych prac. Taki przyrost jest widoczny na początku prowadzenia choćby procesu planowania urbanistycznego obiektów infrastruktury krytycznej.

Żeby spróbować zilustrować tok postępowania wyobraźmy sobie projekt inżynierski, który ma finalnie umożliwić realizację strategicznego obiektu inżynierskiego istotnej infrastruktury krytycznej społeczeństwa (państwa). Już na etapie planowania możemy przewidzieć pewne zagrożenia i spróbować im zapobiec stosując wyłącznie zabiegi choćby urbanistyczne lub na przykład poprzez wykorzystanie, lub wykluczenie, dedykowanych dla konkretnych zagrożeń materiałów konstrukcyjnych. Można porównać tą sytuację do zatrudnienia na wczesnym stadium projektu grupy ekspertów, którzy wskażą luki oraz punkty wymagające usprawnienia w choćby w dokumentacji koncepcji projektowej. Koszty zatrudnienia takiego zespołu, jaki i koszty sugerowanych zmian projektowych są stosunkowo niskie względem całej inwestycji, natomiast

przyrost bezpieczeństwa obiektu znaczący. Taką sytuację przedstawiono na Rys.2 zaznaczonym obszarem „LoP1” (ang. *level of protection*). W tak przygotowanym projekcie koncepcji możemy łatwo kontynuować istotne zwiększanie bezpieczeństwa wraz z umiarkowanym wzrostem kosztów, co odzwierciedla obszar „LoP2”. W etapach kolejnych ta proporcja ulega istotnej zmianie, chcąc ponownie zwiększyć, choćby nieznacznie, poziom bezpieczeństwa obiektu jesteśmy zmuszeni ponieść znaczące wydatki, obszar „LoP3”. Finalnie, dla obiektów o wyjątkowym znaczeniu strategicznym jesteśmy zmuszeni zapewnić maksymalny wymagany (lub wyższy) poziom ochrony infrastruktury nie licząc się z kosztami, zaznaczono obszarem „LoP4”.



Rys. 2. Zależność stopnia ochrony w funkcji poniesionych nakładów finansowych

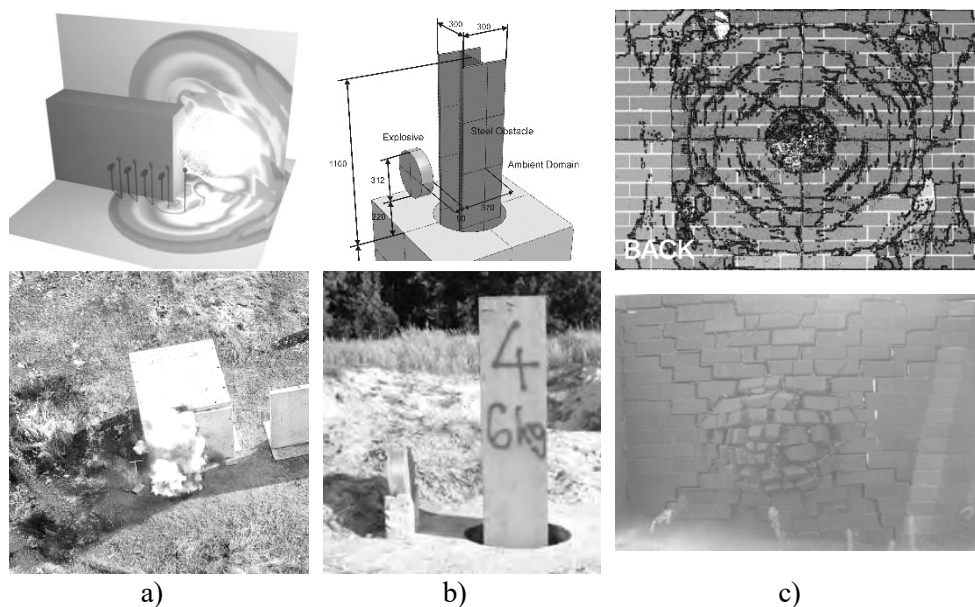
Rozsądne poruszanie się w przedstawionych przestrzeniach celem osiągnięcia pożądanych efektów ochrony wymusza wyjątkowo przemyślane (optymalne) określenie warunków brzegowych, składowych wzoru (1).

3. PRZYJMOWANIE ZAŁOŻEŃ PROJEKTOWYCH

3.1. Konstrukcje inżynierskie

W procesie oceny ryzyka, zaproponowanie i przyjęcie do dalszej pracy metod analiz rozwiązań konstrukcyjnych wpływają istotnie na otrzymany efekt, np. wykonanie wysokiej klasy obiektu (elementu) infrastruktury krytycznej. Inżynierska ocena wyselekcjonowanych, incydentalnych zagrożeń oraz prognozowanych obciążeń dla konstrukcji określa ścieżkę proponowanych rozwiązań. Rozważanie bezpieczeństwa ważnych strategicznych obiektów inżynierskich dotyczy oceny obciążeń takich jak: pociśki lub odłamki [Sielicki, Ślosarczyk i Szulc 2019; Baranowski et al. 2021; Sielicki et al. 2021] a także coraz bardziej powszechnie wykorzystywane bezałogowe statki powietrzne [Kobaszyńska-Twardowska, Łukasiewicz i Sielicki 2022; Gisaro, Turygan i Sielicki 2022]. Nie bez znaczenia jest również powstała w wyniku działania urządzeń wybuchowych fala podmuchowa [Sielicki i Łodygowski 2019; Sielicki, Sumelka i Łodygowski 2019; Gajewski i Sielicki 2020]. Ta gwałtowna zmiana ciśnienia to nieciągłość w przestrzeni, która może się poruszać w powietrzu, w wodzie lub innym medium transmitującym z bardzo dużą prędkością, znacznie przekraczającą prędkość dźwięku. Rozwiązanie układów równań różniczkowych opisujących zjawisko tej propagacji jest zaledwie pierwszym etapem prowadzenia dalszej analizy. Obecnie takie obliczenia są wykonywane z wykorzystaniem zaawansowanych metod komputerowych najczęściej w sprawdzonych kodach komputerowych. Cel obliczeń to otrzymanie rozwiązania z możliwie małym, akceptowalnym błędem [Sielicki i Gajewski 2018; Sielicki i Łodygowski 2019; Sielicki, Sumelka i Łodygowski 2019; Gajewski i Sielicki 2020; Baranowski et al. 2021].

Do wiarygodnych obliczeń matematycznych istotne jest potwierdzenie wiarygodności otrzymywanych wyników. Możliwość takiej weryfikacji następuje m.in. na drodze walidacji eksperymentalnej, która potwierdza lub zaprzecza wstępnie przyjętym założeniom projektowym oraz wybranym schematom obliczeniowym, Rys.3.

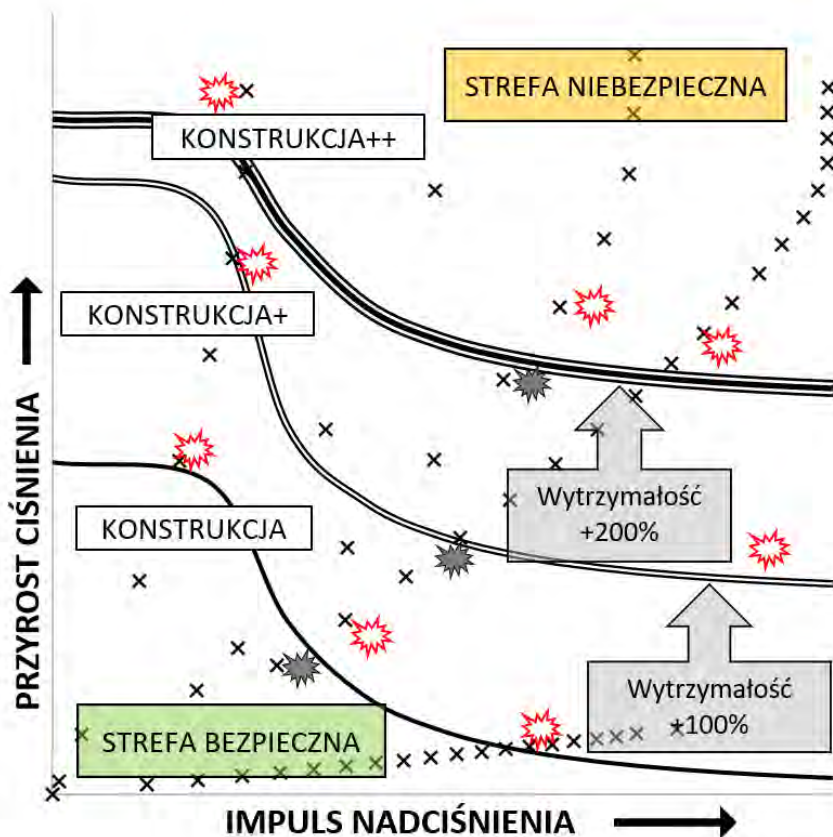


Rys. 3. Proces walidacji eksperymentalnej w warunkach rzeczywistych jako weryfikacja modeli obliczeniowych: a) bezpieczeństwo człowieka stojącego za narożnikiem budynku (Viper::Blast&PUT) [Gajewski i Sielicki 2020], b) wytrzymałość słupa stalowego konstrukcji nośnej [Sielicki, Sumelka i Łodygowski 2019], c) odporność ściany murowanej na działanie wybuchu [Sielicki i Łodygowski 2019]

Prowadzone weryfikacje w warunkach rzeczywistych dają podstawę do określenia skuteczności a w szczególności wartości otrzymywanego błędu także z wykorzystaniem metod numerycznych oraz pracy interdyscyplinarnych zespołów. Dla większości zjawisk dotyczących obciążeń wybuchowych ta ocena nie powinna wykraczać poza 20% błędu od stanu faktycznego. Wówczas możemy mówić o prawidłowym sformułowaniu lub rozwiązaniu problemu. Tak otrzymywane i sprawdzone wyniki stanowią ważną metodę do określenia całej serii zadań pokrewnych wraz z metodologią oceny efektu ich wystąpienia, przy zapewnieniu stosunkowo niskich nakładów finansowych i zachowaniu racjonalnego czasu realizacji projektu.

Przykładowo, dla przedstawionej na Rys.3c jednowarstwowej ściany murowanej zaproponowano rozwiązanie numeryczne wyznaczając maksymalne przemieszczenie ściany w momencie jej zniszczenia. Następnie wykonano serię obliczeń komputerowych wyznaczając dla każdego z wariantów obciążenia wybuchem jego charakterystykę oraz maksymalne przemieszczenie ściany. Kolejno przedstawiono w płaszczyźnie przyrostu ciśnienia oraz impulsu nadciśnienia wyniki dla serii wszystkich scenariuszy, Rys.4 (zaznaczono krzyżykami). Scenariusze były zależne od masy wykorzy-

stanego ładunku wybuchowego (1 do 20 kg) położonego na gruncie w różnej odległości od przeszkody (0 do 5 m). Wysokoenergetyczny ładunek o sferycznym kształcie był zawsze reprezentowany w oparciu o ekwiwalent trotylu. Następnie, wybrane scenariusze obciążenia zostały zwalidowane w kilku rzeczywistych testach poligonowych, co zaznaczono na wykresie nieregularnymi kształtami. Gdy kształt przedstawiono na białym tle wówczas ściana jest zniszczona, jeżeli na tle ciemnym ściana przetrwa. Pozwoliło to wyznaczyć maksymalne krytyczne przemieszczenie dla ściany, porównując je z tym otrzymanym numerycznie, przy którym ściana ulega zniszczeniu. Na tej podstawie określono krzywą wyznaczającą strefę bezpieczeństwa w przestrzeni funkcji charakterystyki obciążenia (masa vs odległość ładunku od przeszkody). Funkcje zaznaczono pojedynczą linią ciągłą. Ten proces pozwolił na płynne przejście do kolejnego etapu analizy dotyczącej propozycji dwóch metod wzmocnienia dla tak skonstruowanej ściany murowanej, Rys. 4.



Rys. 4. Wytrzymałość konstrukcji jednowarstwowej ściany murowanej dla różnych kombinacji obciążenia wybuchem, zwiększenie wytrzymałości poprzez zastosowanie dwóch technik usprawniania istniejących konstrukcji [Sielicki i Łodygowski 2019]

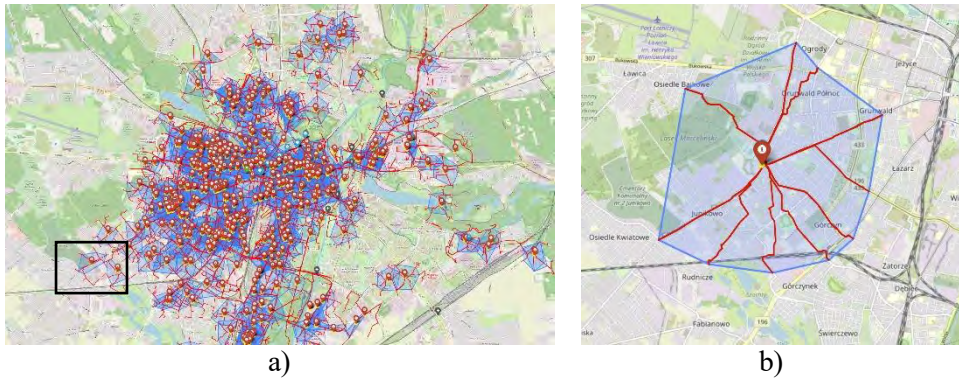
W ramach dalszej pracy zastosowano podobną metodologię jak dla konstrukcji pierwotnej jednak tym razem uwzględniając jej wzmocnienie. Analogicznie, pozwoliło to na wyznaczenie nowej umownej granicy (krzywej bezpieczeństwa) określającej kombinację masy ładunku oraz odległości jego przyłożenia określającą odporność ściany wzmocnionej, Rys.4 linia podwójna.

Walidacja eksperymentalna polegała na ponownym potwierdzeniu prawidłowości otrzymanych wyników w oparciu o powtórzenie eksperymentu w warunkach rzeczywistych dla wybranych skrajnych wariantów obciążenia jednak dla ściany wzmocnionej. Tak dokonana ocena pozwoliła na przejście do ostatniego zadania mającego na celu maksymalizację wzmocnienia ściany. O ile pierwsza z metod była związana z nałożeniem warstwy zewnętrznej wykorzystującej rozwiązanie typowo budowlane, druga bazowała na podobnym pomysłu jednak z wykorzystano specjalnie zaprojektowany materiał bazujący na warstwie aramidowej. Proces prowadzono analogicznie jak poprzednio co pozwoliło na przesunięcie krzywej bezpieczeństwa na kolejny poziom, Rys.4 linia potrójna. Efektem finalnym było zwiększenie poziomu odporności ściany do poziomu żądanego przy zachowaniu tej samej wartości maksymalnego przemieszczenia nośnej części jednowarstwowej warstwy ściany murowanej.

3.2. Ochrona życia ludzkiego

Kolejnym przykładem prowadzenia analizy nietypowych obciążeń jest ocena odporności człowieka. W tym rozważaniu to właśnie człowiek stanowi infrastrukturę krytyczną. W ramach analizy światowych kryteriów bezpieczeństwa człowieka możemy mówić o różnej odporności (zdolności do przeżycia) organizmu ludzkiego. Jednym z nich może być takie kryterium jak na czas mobilizacji, dojścia grupy ludzi do bezpiecznego punktu np. schronu od miejsca stałego pobytu. Takiego rodzaju symulacje są prowadzone m.in. dla infrastruktury miejskiej, gdzie duża liczba mieszkańców w przypadku możliwości wstąpienia obciążeń nietypowych (atak rakietowy, bombardowanie) powinna mieć możliwość dotarcia do schronów (infrastruktury krytycznej miasta) w określonym czasie poruszając się ze stałą prędkością.

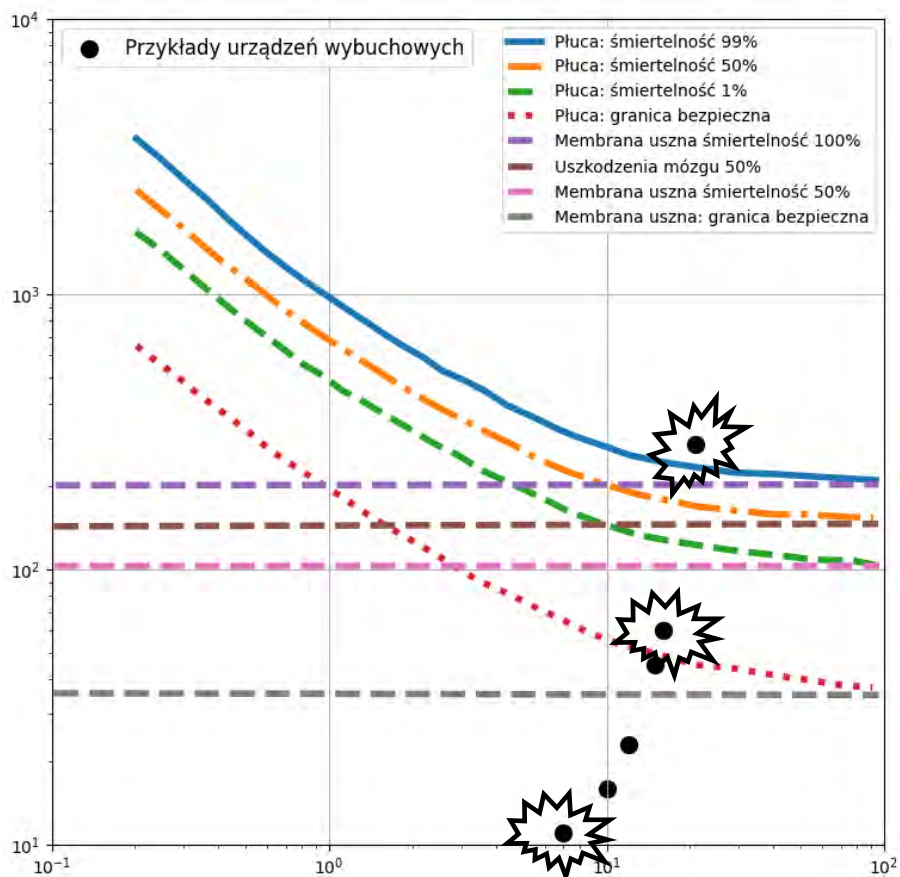
Wirtualny scenariusz przedstawiono na Rys.5. Stosując ogólnodostępne dane o publicznych schronach miejskich określono obszary, miejsca oraz szacunkową liczbę ludzi, którzy będą w stanie osiągnąć bezpieczne schronienie w czasie maksymalnie piętnastu minut od miejsca ich stałego pobytu przy założeniu poruszania się ze średnią prędkością 10 km/h dostępnymi drogami w mieście.



Rys. 5. Schrony miejskie dla ludności cywilnej, analiza pokrycia i użytecznego zasięgu: a) obszar pokrycia fragmentu aglomeracji miejskiej, b) strefa możliwego dojścia do schronu przy założeniu stałej prędkości poruszania się 10 km/h w czasie poniżej 15 minut

Tak prowadzone symulacje są jedynie przybliżeniem stanu faktycznego. Trudno sobie wyobrazić walidację w warunkach rzeczywistych. Otrzymane wyniki dają jednak dobrą podstawę do prowadzenia wiarygodnego procesu decyzyjnego, analizy mnogich scenariuszy oraz modyfikacji lub rozbudowy wybranych obiektów infrastruktury krytycznej miasta.

Kontynuując ocenę bezpieczeństwa ludzkiego nie należy zapomnieć o odporności fizycznej organizmu ludzkiego na oddziaływanie wybuchu. Kryteria związane z uszkodzeniem membrany usznej, płuc czy też mózgu są jednymi z tych, które są obecnie brane pod uwagę w trakcie opracowywania nowoczesnych metod ochrony życia, prowadzenia wiarygodnych prac naukowych. Podobnie jak wcześniej ich walidacja w warunkach rzeczywistych wydaje się trudna do wykonania. Bazując jednak na bogatej literaturze oraz danych historycznych oraz incydentalnych wynikach współczesnej nauki, wspartych komputerowymi technikami obliczeniowymi można przyjąć pewne uproszczenia. Wybrane kryteria zostały zestawione na Rys. 6.



Rys. 6. Skutki oddziaływania ciśnienia wybuchu na ciało ludzkie w odległości 20 m od miejsca eksplozji [Sielicki i Gajewski 2018; Gajewski i Sielicki 2020]

Na znormalizowanym rysunku przedstawiono wartości ciśnienia zarejestrowane eksperymentalnie podczas prowadzenia badań w odległości 20 m. Wartości zostały przedstawione w znormalizowanej przestrzeni stworzonej w oparciu o impuls oraz przyrost ciśnienia w powietrzu. Wskazano szczególną uwagę na trzy z nich. Były to: detonacja 100 i 1000 kg TNT oraz pojazdu osobowego wypełnionego improwizowaną mieszaniną wybuchową.

Należy zwrócić uwagę, że taka forma przedstawienia wyników charakteryzuje się pewnymi ograniczeniami. Jednym z nich jest na przykład brak rozróżnienia masy człowieka. Dziecko oraz dorosły mężczyzna będą mieli istotnie różniącą się wagę. To zaledwie jeden z parametrów mających wpływ na finalną odpowiedź organizmu. Nie mniej jednak ta propozycja stanowi dobry punkt startu i określa warunki początkowe

do prowadzenia analiz podobnych do przedstawionych wcześniej, gdzie zawsze ostatecznie najważniejszy jest człowiek i jego bezpieczeństwo.

4. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W przedstawionej pracy omówiono wybrane aspekty bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej oraz elementy metodologii badawczych mających na celu jej projektowanie jak i szacowanie stopnia zagrożenia. Prezentowane wyniki zostały w dużej mierze opracowane w ramach krajowych projektów badawczych w lokalnych ośrodkach naukowych. Wyniki stanowią wiarygodną podstawę do prowadzenia dalszych prac z zakresu optymalizacji kosztów podczas projektowania konstrukcyjnego elementów jak i całych obiektów infrastruktury krytycznej w kraju. Równocześnie zwrócono uwagę na problem doboru kryteriów do oceny stopnia narażenia życia ludzkiego podczas występowania obciążeń ekstremalnych w postaci fali podmuchowej powstałej podczas wybuchu.

LITERATURA

1. Sielicki, P.W., 2021, Reconstruction of a masonry windmill tower with a multi-blade wind turbine, steel reservoir and water supply system, 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions SAHC 2021, pp. 137-143.
2. Kobaszyńska-Twardowska, A., Łukasiewicz, J., Sielicki, P.W., 2022, Risk Management Model for Unmanned Aerial Vehicles during Flight Operations, *Materials*, 15(7), 2448.
3. Sielicki, P.W., Stewart, M.G., Gajewski, T., ...Studziński, R., Sumelka, W., 2021, Field test and probabilistic analysis of irregular steel debris casualty risks from a person-borne improvised explosive device, *Defence Technology*, 2021, 17(6), pp. 1852–1863.
4. Grisaro, H.Y., Turygan, S., Sielicki, P.W., 2022, Concrete Slab Damage and Hazard from Close-In Detonation of Weaponized Commercial Unmanned Aerial Vehicles, *Journal of Structural Engineering (United States)*, 2021, 147(11), 04021191.
5. Baranowski, P., Kucewicz, M., Małachowski, J., Sielicki, P.W., 2021, Failure behavior of a concrete slab perforated by a deformable bullet, *Engineering Structures*, 2021, 245, 112832.
6. Sielicki, P.W., Łodygowski, T., 2019, Masonry wall behaviour under explosive loading, *Engineering Failure Analysis*, 104, pp. 274-291.
7. Sielicki, P.W., Sumelka, W., Łodygowski, T., 2019, Close Range Explosive Loading on Steel Column in the Framework of Anisotropic Viscoplasticity, *Metals*, 9(4), pp. 9040454-1-9040454-19.

8. Sielicki, P.W., Ślosarczyk, A., Szulc, D., 2019, Concrete slab fragmentation after bullet impact: An experimental study, *International Journal of Protective Structures*, 10(3), pp. 380-389.
9. Sielicki, P.W., Pludra, A., Przybylski, M., 2019, Experimental measurement of the bullet trajectory after perforation of a chambered window, *International Journal of Applied Glass Science*, 10(4), pp. 441-448.
10. Sielicki, P.W., Zhang, X., Bedon, Ch., 2020, Soft Target Protection: Theoretical Basis and Practical Measures, Performance of TGU Windows under Explosive Loading, Springer Netherlands, pp. 49-59.
11. Gajewski, T., Sielicki, P.W., 2020, Experimental study of blast loading behind a building corner, *Shock Waves*, 30(4), pp. 385-394.
12. Sielicki, P.W., Gajewski, T., 2018, Numerical assessment of the human body response to a ground-level explosion, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 22(2), pp. 180-205.

ACKNOWLEDGEMENTS

Badania zostały współfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Konkursu nr 10/2019 na wykonanie projektów w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa.

SELECTED ASPECTS FOR DESIGNING CRITICAL INFRASTRUCTURE UNDER EXPLOSIVE LOADING

Abstract

This work shows a part of the unique blast experiments series carried out at Poznan University of Technology. There were presented general facts from experimental validation processes of primary structural elements such as masonry wall or reinforced column. The actual scenarios subjected to the structures were previously computed using advanced computational techniques and solved numerically. The implementation of the results together with the survival criteria, in which peak overpressure versus positive impulse dependency was demonstrated, allowed to propose an individual protection plans for civil as well as military critical infrastructures.

Keywords: critical infrastructure protection, explosive loading, safety criteria, risk assessment

Rafał ŚLEFARSKI*
Paweł CZYŻEWSKI*
Rafał GORAJ**

OGNIWA PALIWOWE W SYSTEMACH ZASILANIA AWARYJNEGO OBIEKTÓW INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania ogniw paliwowych w systemach zasilania awaryjnego w obiektach infrastruktury krytycznej. Ogniwa paliwowe, jako zapasowe źródło energii elektrycznej łączą zalety powszechnie stosowanych systemów awaryjnego zasilania tj. baterii i silników diesla. Charakteryzują się wysoką sprawnością, szybkim czasem startu, niską lub zerową emisją związków toksycznych oraz hałasu. Spośród dostępnych na rynku technologii ogniw paliwowych w układach zasilania awaryjnego najczęściej stosowane są ogniwa z membraną do wymiany protonów PEMFC (ang. Proton Exchange Membrane Fuel Cell) lub wysokotemperaturowe ogniwa stałotlenkowe SOFC. Ogniwa paliwowe mogą być zasilane paliwami kopalnymi lub odnawialnymi. Zastosowanie zielonego wodoru pochodzącego z procesu elektrolizy wody i odnawialnych źródeł energii pozwala na generację energii elektrycznej bez emisji dwutlenku węgla.

Słowa kluczowe: systemy zasilania awaryjne, ogniwa paliwowe, wódór, dekarbonizacja

1. WPROWADZENIE

Niektóre urządzenia i systemy elektryczne mają duże znaczenie dla funkcjonowania infrastruktury krytycznej, a niespodziewane awarie zasilania mogą powodować zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi, lub prowadzić do powstania poważnych strat ekonomicznych. Takie obiekty, nazywane są infrastrukturą krytyczną i są zazwyczaj wyposażone w tzw. systemy zasilania rezerwowego, które przejmują ciągłość zasilania w przypadku awarii normalnego źródła energii elektrycznej. Do obiektów infrastruktury krytycznej zaliczyć można między innymi:

- stacje bazowe służb ratowniczych,

* Politechnika Poznańska, Instytut Energetyki Ciepłej.

** Polska Spółka Gazownictwa sp. z o.o.

- obsługa sieci przesyłowych i dystrybucyjnych (prąd, gaz, paliwa ciekłe, woda),
- technologie sterowania ruchem (nastawnie kolejowe, systemy sygnalizacyjne, systemy bezpieczeństwa oraz kontrolę operacji lotniczych),
- infrastrukturę teleinformatyczną IT (ochrona centrów danych),
- opiekę zdrowotną (szpitale, systemy podtrzymywania życia),
- produkcja przemysłową (układy sterowania procesami technologicznymi),
- systemy bezpieczeństwa (stanowiska monitorowania i kontroli).

Według danych operatora systemu elektroenergetycznego (PSE S.A.) w ostatnich pięciu latach od 2016 do 2021r. w Polsce na skutek przerw krótkich, długich oraz bardzo długich, z uwzględnieniem przerw katastrofalnych, nie dostarczono do odbiorców finalnych ponad 591 MWh energii elektrycznej. W związku ze starzeniem się jednostek wytwórczych w Europie oraz znacząco zwiększonym udziałem energetyki odnawialnej, Europejska organizacja operatorów przesyłowych energii elektrycznej ENTSO-E, szacuje, że wskaźnik opisujący niezawodność systemu LOLE (z ang. Loss of Load Expectation, oznaczający przewidywaną liczbę godzin w roku, w których zasoby dostępne w danym systemie energetycznym są za małe, by pokryć aktualne zapotrzebowanie na energię) może w Polsce zwiększyć się z wartości 3 do nawet 10 godzin na rok już w 2025 roku [ENTSO-E Winter Outlook 2021–2022].

Jedną z możliwości zabezpieczenia obiektów infrastruktury krytycznej przed brakiem energii elektrycznej jest wprowadzenie układów zasilania awaryjnego, które dzieli się zazwyczaj na zasilacze awaryjne UPS (z ang. uninterruptible power supply) oraz systemy zasilania awaryjnego EPS (z ang. Emergency Power Supply). Systemy UPS bazują na energii dostarczanej z akumulatorów, co ogranicza ich czas pracy w zakresie od kilku minut do kilku godzin. W celu przetrwania dłuższych okresów awarii zasilania, systemy UPS są zazwyczaj rozbudowywane o układy EPS. Bazują one głównie na połączeniu generatora prądu elektrycznego z silnikiem tłokowym zasilanym paliwami kopalnymi, takimi jak: olej napędowy, benzyna, gaz ziemny czy LPG (Liquefied Petroleum Gas). W dobie dekarbonizacji procesów wytwarzania energii elektrycznej, związanych z uchwaleniem w UE w Prawa Klimatycznego, którego celem jest neutralność klimatyczna w 2050 roku [European Climate Pact, 2021] do zasilania systemów rezerwowych brane są również pod uwagę paliwa alternatywne takie jak metanol, amoniak czy wodór. Parametry fizykochemiczne paliw alternatywnych (Tablica 1) mogą jednak powodować szereg problemów ich bezpośredniego stosowania w silnikach tłokowych stosowanych do napędu generatorów prądu elektrycznego. Wśród nich można wymienić:

- trudności z rozruchem zimnego silnika w przypadku zastosowania metanolu, spowodowane niższym ciśnieniem niż w przypadku mieszanki benzynowo – powietrznej,
- pogorszenie warunków smarowania poprzez wypłukiwanie oleju,
- zwiększoną korozją chemiczną i wysokotemperaturową elementów silnika,

– zwiększoną emisją związków toksycznych (paliwowe tlenki azotu) w przypadku zastosowania wodoru,
 możliwością występowania spalania stukowego prowadzącego do uszkodzenia silnika (silniki gazowe zasilane wodorem).

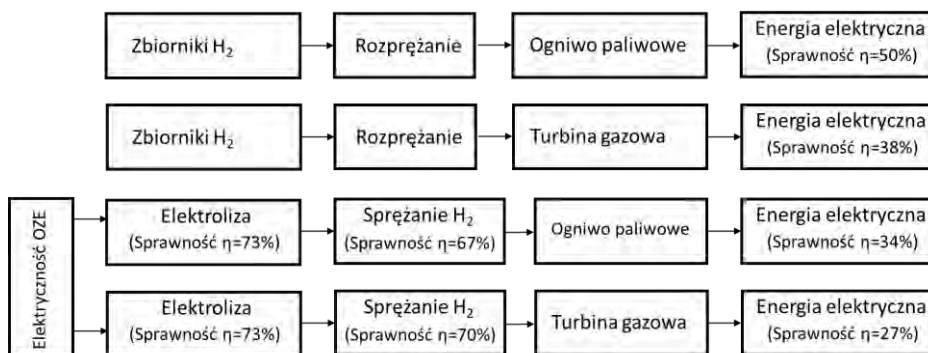
Tabela 1

Parametry energetyczne paliw [Nicoletti et al. 2015, Jójka i Ślefarski 2018]

Parametr	Jednostka	Diesel	Propan	Metanol	Gaz ziemny	Wodór
Stan skupienia ¹	-	ciecz	gaz	ciecz	gaz	gaz
Gęstość ¹	kg/m ³	760	1.81	792	0.72	0.08
Ciepło spalania	MJ/kg	42.6	46.3	19.8	50.4	120
Gęstość energii ¹	kWh/kg	11.9	12.9	5.5	13.9	33.3
Temperatura auto zapłonu	K	523	723	738	813	858
Adiabatyczna temperatura spalania ²	K	2300	2250	2222	2214	2480
Wskaźnik emisji CO ₂	kg/GJ	74.1	63.1	69.1	55.8	0

¹ - w warunkach standardowych P=1.013bar, T=288K; ² – stechiometryczny proces spalania w powietrzu

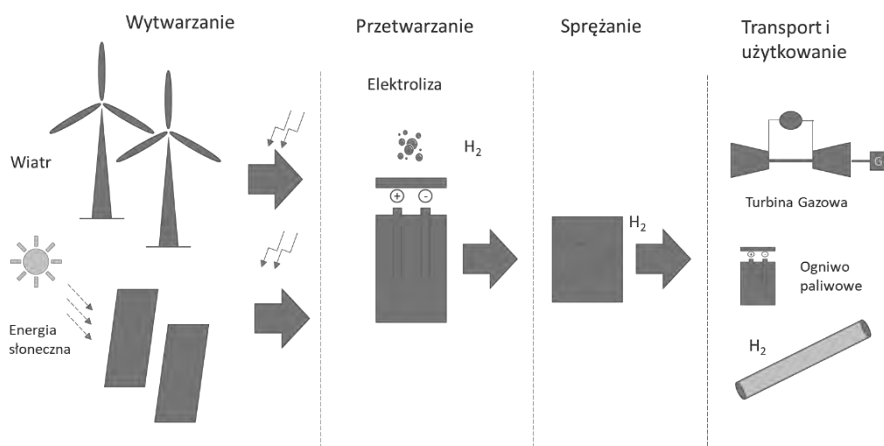
Analiza parametrów energetycznych paliw zdekarbonizowanych wykazuje duży potencjał możliwości zastosowania wodoru w systemach generacji energii elektrycznej w układach zasilania awaryjnego. Wodór może być zastosowany, jako paliwo do napędu turbin gazowych lub stosowany w ogniwach paliwowych. Może również stanowić substrat do produkcji paliw syntetycznych. Schemat możliwości zagospodarowania wodoru pokazano na rysunku 1 zgodnie [Chmielniak, Lepszy i Mońka, 2017].



Rys. 1. Zastosowanie wodoru w produkcji energii elektrycznej

Obecnie większość wodoru produkuje się z paliw kopalnych z wykorzystaniem technologii reformingu parowego (około 95%), gdzie substratami do produkcji są gaz

ziemny (48%), ropa naftowa (30%) oraz węgiel (18%). Wodór taki w nomenklaturze nazywany jest wodorem szarym, czarnym lub niebieskim (produkcja wodoru połączona z sekwestracją CO₂). Pozostałe 4% nazywane jest wodorem odnawialnym pochodzącym z procesów elektrolizy wody lub procesów termo-chemicznych (wodór zielony, różowy lub purpurowy). Zgodnie z polityką energetyczną EU, najbardziej promowaną ścieżką pozyskiwania wodoru jest elektroliza wody z wykorzystaniem energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych. W opublikowanym w marcu 2022 roku komunikacie RePowerEU [Plan REPowerEU, 2022] dotyczącym działań nadzwyczajnych mających na celu zwiększenie niezależności ogólnounijnego systemu energetycznego w obliczu rosyjskiej inwazji na Ukrainę, założono przyspieszenie rozwoju produkcji zielonego wodoru i produkcję 10 mln ton H₂ do 2030 roku. Stanowi to ponad dwukrotny wzrost w odniesieniu do założeń opublikowanych w Dyrektywie o Odnawialnych Źródłach Energii ze stycznia 2021 roku. Zaletą produkcji zielonego wodoru jest możliwość wykorzystania wodoru jako nośnika energii do magazynowania energii elektrycznej, w stanach jej nadprodukcji, pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Technologie takie nazywane są Power to X, gdzie X może oznaczać produkcję wodoru (Power to H₂), produkcję metanu (Power to Gas) lub dowolnego związku chemicznego np. amoniaku (Power to NH₃). Produkcja wodoru w układzie wyspowym dodatkowo wpływa na niezależność oraz bezpieczeństwo funkcjonowania systemów zasilania awaryjnego. Schemat technologii Power to H₂ pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat łańcucha dostaw wodoru w technologii Power to H₂

Producenci turbin gazowych (Siemens, GE, Mitsubishi Power) deklarują, że wprowadzenie wodoru jako głównego paliwa do napędu turbin gazowych będzie możliwe już w roku 2030. Jednak w chwili obecnej najbardziej zaawansowanym technologicznie urządzeniem do generacji energii elektrycznej w oparciu o paliwo wodorowe są ogniwa paliwowe (z ang. Fuel cells). Ogniwa znajdują szerokie zastosowanie

w układach zasilania rezerwowego w następujących obszarach infrastruktury krytycznych [Zhiwen, Eichman i Kurtz, 2017]:

- służby ratownicze (stacje bazowe, urządzenia mobilne),
- obsługa sieci przesyłowych i dystrybucyjnych,
- stacje uzdatnianie wody,
- technologia sterowania ruchem (nastawnie kolejowe, systemy sygnalizacyjne, systemy bezpieczeństwa),
- obsługa portów lotniczych,
- infrastruktura IT (ochrona centrów danych),
- opieka zdrowotna (szpitale, mobilne stacje medyczne),
- produkcja przemysłowa (kontrola operacyjna technologii).

2. OGNIWA PALIWOWE

Wśród zastosowań energetycznych wymienić można pięć typów ogniw paliwowych: ogniwa alkaiczne (AFC) ogniwa paliwowe z polimerowym elektrolitem (PEMFC), ogniwa fosforowe (PAFC), ogniwa węglanowe (MCFC) oraz ogniwa stałotlenkowe (SOFC). Sprawność generacji energii elektrycznej dla wymienionych ogniw paliwowych mieści się w przedziale od 40 do 60%. W zależności od temperatury pracy ogniwa charakteryzuje się, jako ogniwa nisko lub wysokotemperaturowe. Do pierwszej grupy zalicza się ogniwa AFC oraz PEMFC, dla których temperatura pracy wznosi od 40 do 120°C. Ogniwa PEMFC, ze względu na zastosowanie katalizatora, wymagają zastosowania paliwa wodorowego o wysokiej czystości na poziomie 99.95%. Jednakże charakteryzują się one możliwością szybkiego startu oraz pozwalają na szybkie zmiany obciążenia podczas pracy. Do grupy ogniw wysokotemperaturowych (temperatura pracy od 150-1000°C) należą ogniwa PAFC, MCFC oraz SOFC. Charakteryzują się one większą mocą systemu i są mniej odporne na częste uruchomienia i zmiany mocy powodowane koniecznością utrzymania odpowiednich gradientów temperatury. Zaletą ogniw wysokotemperaturowych jest możliwość ich zasilania gazem ziemnym dostarczonym z sieci lub zbiorników magazynowych. Porównanie technologii ogniw paliwowych pokazano w tablicy 2 [Liu, Kim i Shin, 2021; Fuel Cell Combined Heat and Power for Specialised Trade – Training Documents, 2020].

Ogniwa PEMFC mają duże zastosowanie w transporcie (pojazdy lekkie, autobusy, jachty) ze względu na ich niski wpływ na środowisko naturalne, a zwłaszcza emisję gazów cieplarnianych [Young, 2007; Jung-Ho, 2006].

Tabela 2

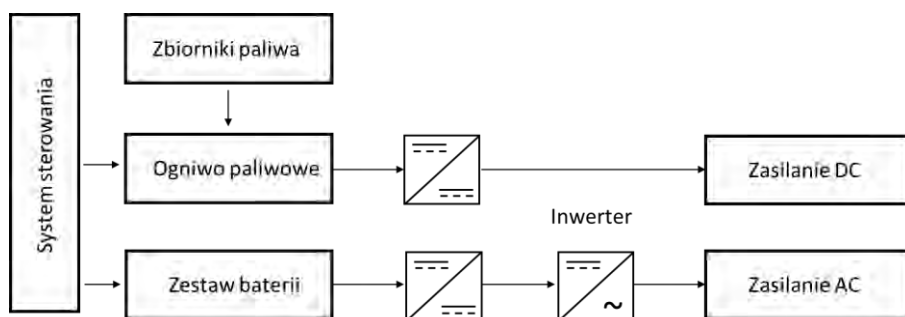
Parametry technologiczne ogniw paliwowych

Parametr	Jednostka	Technologia ogniw paliwowych				
		AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Temperatura pracy	°C	60-90	<120	150-200	600-700	500-1000
Sprawność generacji energii	%	45-60	45-60	40	45-60	60
Typowe moce elektryczne	kW	<100	1-100	5-500	300-3000	1-2000
Czas rozruchu	-	szybki		średni	wolny	
Aplikacje	-	EPC, wojskowe	EPC, transport, pojazdy specjalne	energetyka zawodowa, energetyka rozproszona		

Ponadto z powodzeniem stosowane są w systemach UPS i EPC oraz do zasilania urządzeń przenośnych. Ogniw wykonane w technologii PAFC są natomiast uważane za jedną z najbardziej rozwiniętych technologii ogniw paliwowych, łatwych do powszechnej komercjalizacji. Charakteryzują się wysoką niezawodnością, sprawnością i elastycznością w różnych zastosowaniach, zwłaszcza w energetyce rozproszonej [Sammes, Bove i Stahl, 2018]. SOFC mają kilka zalet, takich jak: wysoka sprawność elektryczna, wysoka jakość dostarczanego ciepła (ciepło wysokotemperaturowe), niewielki rozmiar instalacji, elastyczność wykorzystania paliwa oraz zastosowanie ekonomicznych materiałów [Park, Min i Hong, 2019]. Z powodzeniem sprawdzają się w urządzeniach stacjonarnych do wytwarzania energii elektrycznej w dużej skali (MWel). Zazwyczaj pracują w systemach skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej (z ang. Combined Heat and Power, CHP). Jako źródło energii elektrycznej do zastosowań CHP brane są również pod uwagę ogniw PEMFC i PEMF.

3. SYSTEMY ZASILANIA AWARYJNEGO Z OGNIWAMI PALIWOWYMI

Budowa układu zasilania awaryjnego z wykorzystaniem ogniw paliwowych (FC) zależy od wymaganej mocy systemu, typu zastosowanego paliwa oraz rodzaju wymaganego zasilania. Typowy układ składa się z: zestawu ogniw paliwowych wraz z układem chłodzenia, zbiorników do magazynowania paliwa, układu sterowania, baterii zapewniających energię w czasie załączania, obudowy zapewniającej wymagane warunki termiczne oraz przetwornika DC/AC. Schemat układu zasilania awaryjnego pokazano na rysunku 3 [Eska i Corneille, 2018].



Rys. 3. Przykładowy schemat instalacji EPS z ogniwami paliwowymi

Spotykane na rynku systemy bardzo często opierają się o budowę modułową pozwalającą użytkownikowi na skalowanie mocy systemu zasilania awaryjnego. Poszczególne moduły umieszcza się w obudowie typu „rack” 19”. Przykładowe rozwiązanie układu EPS zasilanego wodorem pokazano na rysunku 4. System EPS składa się z dwóch części: ogniw polimerowych o mocy sumarycznej 5kW połączonych ze zbiornikami wodoru o ciśnieniu 300 bar. Pozwala to na wytwarzanie energii elektrycznej przez okres 72h.



Rys. 4. Zdjęcie instalacji zasilania awaryjnego z ogniwami PEMFC i zbiornikami wodoru

Uzupełnienie systemu o układ zasilania wodorem poprzez zastosowanie elektrolizera połączonego z modułami fotowoltaicznymi czyni powyższy system paliwowo niezależnym. Systemy zasilania awaryjnego bazujące na ogniwach paliwowych łączą w sobie zalety systemów bateryjnych oraz układów opartych na generatorach prądu zasilanych silnikami tłokowymi (głównie silniki Diesla). W zależności od typu paliwa (H_2 , CH_4 czy metanol) podobnie jak baterie, mogą pracować, jako urządzenia nisko lub zero emisyjne, ale zapewniają dłuższą żywotność systemu,

zbliżoną do rozwiązań opartych na silnikach tłokowych. Dodatkowo budowa modułowa pozwala na skalowanie dostępnej mocy urządzenia.

W chwili obecnej znaczną barierą rozwoju systemów zasilania awaryjnego opartych na FC są wyższe koszty budowy układów EPC, od 4 do 5-ciu razy w porównaniu do klasycznych rozwiązań. Dla przykładu koszt budowy systemu o mocy wyjściowej w zakresie od 50 do 100kW waha się od 3000 do 4000 EUR/kW_{el} [Cigolotti, Genovese i Fragiacom, 2021], gdzie dla analogicznej mocy generatora Diesla, koszty budowy wynoszą od 800 do 1000 EUR/kW_{el}. Jednakże w analizie całkowitych kosztów eksploatacji ogniwa paliwowe osiągają próg rentowności już po kilku latach, dzięki niższym kosztom serwisowym. Prowadzone badania pokazują, że dalsza poprawa wydajności (ogniwa paliwowe, elektrolizery, zbiorniki do magazynowania H₂) spowoduje znaczne obniżenie kosztów, co powinno w przyszłości doprowadzić do zmniejszenia kosztów budowy systemów EPS do poziomu konwencjonalnych generatorów na paliwa kopalne. W zależności od przyjętego tempa rozwoju technologii szacuje się, że koszty generacji energii elektrycznej pochodzącej z takich systemów będą wynosić od 0.2 do 0.5 EUR/kWh. Obecny koszt energii elektrycznej z generatorów zasilanych silnikami Diesla wynosi od 0.26 do 0.33 EUR/kWh. Porównanie systemów zasilania awaryjnego z wykorzystaniem różnych źródeł energii pokazano w tabelicy 3 [Eska i Corneille, 2018].

Tabela 3

Porównanie technologii systemów zasilania awaryjnego

Kryterium	Baterie	Silnik Diesla	Ogniwo paliwowe
Niezawodność załączenia	++	+	++
Sprawność	++	-	+
Utrata sprawności w stanie czuwania	++	-	+
Żywotność	-	++	+
Hałas	--	++	-
Emisja gazów toksycznych	--	++	-
Koszty inwestycyjne	++	-	+
Koszty serwisowe	--	++	-
Oznaczenia: ++ znacznie większa/y/e od pozostałych technologii, + większa/y/e od pozostałych technologii, - mniejsza/y/e od pozostałych technologii, -- znacznie mniejsza/y/e od pozostałych technologii			

4. PODSUMOWANIE

Podstawowym celem systemów zasilania rezerwowego jest zapewnienie obiektem zasilania w energię elektryczną podczas awarii sieci i umożliwienie płynnego

przejścia do trybu zasilania wyspowego. Jednym z rozwiązań spełniających wymienione wymagania są układy zasilania rezerwowego oparte na ogniwach paliwowych. Dzisiaj ze względu na niedojrzałość technologiczną, wysokie koszty urządzeń oraz wysoki koszt produkcji wodoru urządzenia takie stanowią tylko ułamek rynku systemów UPC i EPS. Głównymi paliwami pozostają nadal diesel, benzyna oraz gaz ziemny.

Redukcja kosztów wytwarzania ogniw paliwowych, zwiększenie ilości zielonego wodoru oraz postępująca dekarbonizacja procesów wytwórczych energii elektrycznej mogą spowodować, że w niedalekiej przyszłości systemy zasilania awaryjnego bazujące na ogniwach paliwowych mogą stać się podstawowym układem awaryjnych systemów zasilania. Zaletami takich układów są wysoka sprawność, niezawodność załączania w stanach awaryjnych, cicha praca (powodowana wyłącznie przez układ chłodzenia) czy bezobsługowość (brak koniecznych serwisów), predysponując tą technologię do zasilania obiektów strategicznych. Ponadto, połączenie systemów wykorzystujących ogniwa paliwowe z odnawialnymi źródłami energii zapewnia niezależność paliwową, co dodatkowo podnosi bezpieczeństwo funkcjonowania obiektów strategicznych

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. Nicoletti G., Arcuri N., Nicoletti G., R. Bruno, 2015, A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels, *Energy Conversion and Management*, Volume 89, s. 205-213.
2. Jójka J., Ślefarski R., 2018, Dimensionally reduced modeling of nitric oxide formation for premixed methane-air flames with ammonia content, *Fuel*, vol. 217, s. 98-105.
3. Chmielniak T., Lepszy S., Mońka P., 2017, *Energetyka wodorowa – podstawowe problemy*, tom 20/3 s. 55-66.
4. Liu, J.; Kim, S.-C.; Shin, K.-Y. 2021 Feasibility Study and Economic Analysis of a Fuel-Cell-Based CHP System for a Comprehensive Sports Center with an Indoor Swimming Pool. *Energies*, 14, 6625.
5. Jung-Ho W., 2007, Applications of proton exchange membrane fuel cell systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, s. 1720–1738.
6. Young B., *Thermofluid Modeling of Fuel Cells*, 2007, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 39:1, s.193-215.
7. Sammes, N.; Bove, R.; Stahl, K., 2004, Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications. *Curr. Opin. Solid State Mat. Sci.*, 8, s. 372–378.
8. Park, Y.J.; Min, G.; Hong, J., 2019, Comparative study of solid oxide fuel cell-combined heat and power system designs for optimal thermal integration. *Energy Conversion and Management*, Volume 182, s. 351–368.
9. Cigolotti, V.; Genovese, M.; Fragiaco, P., 2021, Comprehensive Review on Fuel Cell Technology for Stationary Applications as Sustainable and Efficient Poly-Generation Energy Systems. *Energies*, vol. 14, s.4963.

Rozporządzenia

1. European Climate Pact, 2021.
2. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-społecznego i Komitetu Regionów, Plan RePowerEu, 2022.

Opracowania i raporty z badań

1. European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2021, ENTSO-E Winter Outlook 2021–2022.
2. National Renewable Energy Laboratory Zhiwen M., Eichman J., Kurtz J., 2017, Fuel Cell Backup Power Unit Configuration and Electricity Market Participation: A Feasibility Study, Technical Report NREL/TP-5400-67408,
3. The PACE Project Consortium Partners, 2020, Fuel Cell Combined Heat and Power for Specialised Trade – Training Documents
4. NOW GmbH – National Organisation Hydrogen and Fuel Cell Technology, 2018, Eska B., Corneille M., Uninterruptible Power Supply (UPS) And Emergency Power Systems (EPS) With Fuel Cells, Clean Power Net.

ACKNOWLEDGEMENTS

Opracowanie przygotowane w ramach niniejszego artykułu było współfinansowane ze środków na subwencji badawczej projekt numer SBAD/5202, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska

EMERGENCY POWER SUPPLY SYSTEMS POWERED BY FUEL**Abstract**

Paper presents the possibility of application of fuel cells in emergency power systems in critical infrastructure facilities. Fuel cells, as a backup source of electricity, combine the advantages of commonly used emergency power systems, such as batteries and diesel engines. They are characterized by high efficiency, fast start-up time, low or zero toxic emissions or noise. Available fuel cell technologies such as Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) or High Temperature Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) are the most commonly used in commercially in backup power systems. Fuel cells can operate on fossil fuels or renewable fuels. Use of green hydrogen, from water electrolysis and renewable energy sources, allows to emergency power systems generation of carbon dioxide free electricity.

Słowa kluczowe: emergency power supply systems, fuel cells, hydrogen, decarbonisation process

Aleksandra STANEK-KLEPUSZEWSKA *

POSTAWA CIAŁA I ZABURZENIA POSTAWY U PILOTÓW WOJSKOWYCH

Sedenteryjny tryb życia jest obecnie wymieniany jest jako jeden z czynników zaburzających postawę ciała oraz powodujących dolegliwości bólowe kręgosłupa. Pilot wojskowy pracuje w środowisku obciążającym układ mięśniowo-szkieletowy: szybkie zmiany wysokości, przyspieszenia, hałas, wibracje, zmiany ciśnienia atmosferycznego, niedotlenienie organizmu, praca z niekorzystnym rozkładem przyrządów na tablicy pokładowej, wymuszona pozycja ciała w fotelu lotniczym oraz konieczność używania hełmu lotniczego i gogli noktowizyjnych w czasie lotu. Destrukcyjne czynniki zewnętrzne powodują, iż niezbędnym dla pilota wojskowego jest stosowanie profilaktyki uszkodzeń układu ruchu, a jej istotnym elementem jest wprowadzenie do codziennej aktywności ćwiczeń funkcjonalnych, zawierających wszystkie elementy motoryki podstawowej (mobilność, stabilność, propriocepcja).

Słowa kluczowe: pilot wojskowy, postawa ciała, core, profilaktyka

1. WPROWADZENIE

Sedenteryjny tryb życia jest obecnie wymieniany jest jako jeden z czynników zaburzających postawę ciała oraz powodujących dolegliwości bólowe kręgosłupa, szczególnie w połączeniu z dodatkowymi czynnikami takimi jak hałas oraz wibracje [Kaczor et al. 2011]. Długotrwała pozycja siedząca wpływa negatywnie nie tylko na układ mięśniowo-szkieletowy, ale także na układy: krwionośny, nerwowy oraz pokarmowy. Celem uniknięcia tych dolegliwości, wśród obecnych zaleceń profilaktycznych wymienia się różne sposoby siedzenia, modyfikację krzeseł i foteli oraz częste zmiany pozycji [Czaprowsk, Leszczowska, Sitarski 2014]. Niestety pilot wojskowy nie ma możliwości zmiany zarówno fotela lotniczego jak i pozycji którą przyjmuje.

* Wojskowy Ośrodek Szkoleniowo-Kondycyjny w Zakopanem

2. WARUNKI PRACY PILOTA WOJSKOWEGO

Pilot wojskowy pracuje w warunkach ekstremalnych. Działa w otoczeniu określonych warunków meteorologicznych, ukształtowania terenu, pory dnia oraz ugrupowania innych statków powietrznych. Działając w deficycie czasowym oraz w narażeniu na przeciążenia musi odbierać informacje od obsługi naziemnej, z przyrządów znajdujących się na tablicy pokładowej, z otoczenia oraz od załogi statku powietrznego. Otrzymywane informacje musi właściwie i szybko przetworzyć oraz wykorzystać gdyż jakikolwiek, nawet niewielki błąd uwarunkowany czynnikami psychofizycznymi (nadmierne napięcie emocjonalne, niedokładna koordynacja nerwowo-mięśniowa, nieadekwatny i zbyt wolny odbiór oraz przetwarzanie informacji, niepewność w podejmowaniu decyzji) może powodować katastrofalne skutki prowadzące do wypadku lotniczego. Pilot musi być zatem zaadaptowany do pracy w ciągłych warunkach ryzyka związanego z przyjmowaniem niekorzystnej dla swojego układu ruchu pozycji siedzącej w fotelu lotniczym [Kattenbach 2016].

3. POSTAWA CIAŁA

3.1. Prawidłowa postawa ciała

Prawidłowa postawa ciała jest niezbędna do wykonywania wszystkich czynności czuciowych i ruchowych oraz do prawidłowego funkcjonowania wszystkich układów organizmu człowieka. Stanowi indywidualny i charakterystyczny dla danego człowieka układ ciała w pozycji stojącej i wynika z łącznego współdziałania poszczególnych układów, które są zależne od procesów zachodzących w ośrodkowym układzie nerwowym (OUN) [Błaszczuk 1993]. Z kolei mięśnie biorące czynny udział w utrzymaniu postawy ciała nazywane są mięśniami posturalnymi (tonicznymi). Zaliczamy do nich: mięsień wielodzielny, mięsień prostownik grzbietu, mięsień prosty oraz poprzeczny brzucha, przeponę, mięsień pośladkowy wielki, mięsień czworogłowy uda, mięsień trójgłowy łydki, mięsień obły mniejszy i większy oraz mięśnie dna miednicy. Oprócz utrzymywania postawy ciała, mięśnie te odpowiadają również za jakość pracy narządów wewnętrznych oraz mają wpływ na pracę układu pokarmowego, oddechowego, krwionośnego oraz nerwowego [Schunke et al. 2015].

3.2. Stabilność tułowia

Właściwe napięcie tułowia i odpowiedni tonus mięśniowy utrzymuje wszystkie segmenty kręgosłupa w naturalnej pozycji podczas wykonywania każdego ruchu

ciała. Stabilność tułowia to zdolność do kontrolowania pozycji i ruchów tułowia, co umożliwia wytworzenie optymalnej siły i przeniesienie jej na dystalne i proksymalne odcinki ciała. To zdolność kompleksu biodrowo-miedniczo-łędźwiowego do utrzymania kręgosłupa i składających się na niego struktur w fizjologicznym położeniu poprzez właściwy rozkład działających sił [Bagherian et al. 2019]. Ponadto umożliwia zachowanie równowagi, czyli utrzymania określonej pozycji ciała poprzez równoważenie sił działających na ciało oraz ich momentów. Polega na aktywnym przywracaniu typowej pozycji ciała w przestrzeni po utraceniu prawidłowej postawy w wyniku działania czynników destabilizujących, do których zaliczyć możemy między innymi długotrwałe siedzenie w pozycji niekorzystnej [Elphinston 2016]. Z kolei stabilność posturalna to odporność postawy na zakłócenia wewnętrzne jak i zewnętrzne, których źródłem może być zarówno zmienność środowiska jak i relacja organizmu z otoczeniem [Błaszczuk, Czerwos 2005]. W związku z powyższym centrum stabilizacji tułowia zwane *core* tworzą mięśnie, które oddziałują na organizm człowieka z każdej ze stron: od przodu mięśnie brzucha, od tyłu mięśnie przykręgosłupowe oraz niżej położone mięśnie pośladkowe, od góry przepona, natomiast od dołu mięśnie dna miednicy. Brak balastu pomiędzy tymi mięśniami powoduje destabilizację postawy ciała prowadzącą do zaburzeń posturalnych i ustrojowych całego organizmu człowieka [Kocjan et al. 2017].

3.3. Przepona

Jednym z najważniejszych mięśni odpowiadających za stabilną postawę ciała jest przepona. Jest głównym mięśniem wdechowym kształtem przypominającym spadochron. Oddziela jamę klatki piersiowej od jamy brzusznej i ma wpływ na działanie każdego układu w organizmie. Nieprawidłowa jej praca może powodować zaburzenia oddechowe (duszność, mniejszą wydolność oddechową, objawy astmy), bóle głowy, niższą tolerancję wysiłku, zaburzenia ze strony układu sercowo-naczyniowego, które obniżają ciśnienie wewnątrz jamy brzusznej powodując większy obwód brzucha oraz zaburzenia postawy ciała prowadzące do zwiększonej lordozy lędźwiowej, rozciągnięcia mięśni kulszowo-goleniowych, uniesienia mostka, większej niestabilności miednicy i odcinka lędźwiowego kręgosłupa, zwiększonego napięcia mięśni przykręgosłupowych, bólu odcinka lędźwiowego, zespołu górnego otworu klatki piersiowej oraz bólu stawów krzyżowo-biodrowych. Ponadto ze względu na połączenia nerwowe, nieprawidłowa praca przepony może także powodować problemy w obrębie obręczy ramiennej [Paoletti 2012, Kocjan 2017].

4. CZYNNIKI ZABURZAJĄCE POSTAWĘ CIAŁA PILOTA WOJSKOWEGO

Postawa ciała oraz jej stabilność zmieniają się przez całe życie i zależą od osobniczych warunków anatomicznych oraz fizjologicznych, jak i od czynników zewnętrznych wpływających na jej zaburzenia. Wśród czynników destabilizujących, na które narażony jest pilot wojskowy można wymienić: szybkie zmiany wysokości, przyspieszenia, hałas, wibracje, zmiany ciśnienia atmosferycznego, niedotlenienie organizmu, praca z niekorzystnym rozkładem przyrządów na tablicy pokładowej, wymuszona pozycja ciała w fotelu lotniczym oraz konieczność używania hełmu lotniczego i gogli noktowizyjnych w czasie lotu. Ponadto jest to praca o różnej porze dnia i nocy, niezależnie od pory roku czy dni wolnych. Pilot wojskowy zatem może spędzić za sterami statku powietrznego od 24 do 40 godzin tygodniowo i maksymalnie od 540 do 900 godzin rocznie. Maksymalna dobową długość lotu może wynosić 10 godzin w załodze wieloosobowej, a czas lotu zależy od ilości załogi na statku powietrznym i obecności autopilota [RL SPow. 2016]. Kolejnym aspektem na który należałoby zwrócić szczególną uwagę jest stres psychiczny wynikający z poczucia odpowiedzialności za powierzone zadania lotnicze, świadomość zagrożenia i możliwości utraty zdrowia, a nawet życia oraz obsługę bardzo drogiego sprzętu lotniczego. Pilot działa balansując na granicy predyspozycji psychofizycznych, co przeciąża jego układy, do których możemy zaliczyć układ: mięśniowo-szkieletowy (mięśnie posturalne), krwionośny (praca serca), oddechowy (praca przepony), nerwowy (praca ośrodkowego układu nerwowego), prowadzące w konsekwencji do destabilizacji postawy ciała [Klukowski 2009, Wierzejewska 2016].

5. CHARAKTERYSTYKA POSTAWY CIAŁA PILOTA WOJSKOWEGO

Postawę ciała pilota wojskowego charakteryzuje zamknięta klatka piersiowa, protrakcja ramion, zmniejszona lordoza szyjna, ograniczony zakres ruchu zgięcia stawów ramiennych, napięte mięśnie przedniej strony klatki piersiowej oraz mięśnie obręczy ramiennej. Ponadto często występuje przodopochylenie miednicy, nadmierne napięcie mięśni biodrowo-łędźwiowych, czworogłowych uda, mięśni grupy kulszowo-goleniowej oraz mięśni grupy przyśrodkowej uda, co jest bezpośrednio związane z ograniczonym zakresem ruchu stawów biodrowych. Widoczna asymetria postawy ciała i dysbalans mięśniowy ma także związek z pełnieniem funkcji pierwszego lub drugiego pilota, czyli z obsługiwaniem układu sterowania (po lewej lub prawej stronie). Pilot wojskowy pracuje w określonej pozycji siedzącej, w fotelu lotniczym, który w statkach powietrznych wielozadaniowych ma stałe ustawienie (F-16 - 30° , MiG-29 - 18°) [Jędryś, Breszka i Kowalczyk 2020], natomiast w po-

zostałych statkach powietrznych ma ograniczone możliwości ustawienia (np. w samolocie transportowym CASA C-295M, fotel ma możliwość regulacji oparcia i zagłówka oraz siedziska, w samolocie transportowym Bryza M-28 występuje regulacja góra-dół oraz odległości od orczyka, natomiast w niektórych śmigłowcach regulowana jest tylko wysokość siedziska). W tej niekorzystnej pozycji, pilot wojskowy narażony jest na działanie przyspieszenia, czyli zjawiska powstającego na skutek zmian prędkości ruchu lub/i jego kierunku co powoduje pojawienie się szeregu zaburzeń w organizmie [Jędrys, Breszka i Kowalczyk 2020].

6. PROFILAKTYKA ZABURZEŃ POSTAWY CIAŁA PILOTA WOJSKOWEGO

6.1. Definicja profilaktyki

Profilaktyka zdrowotna to działania podejmowane w celu utrwalania prawidłowych nawyków zdrowotnych zapobiegających pojawianiu się i rozwojowi wielu chorób, w tym także przeciążeń i chorób układu ruchu. Profilaktykę dzieli się na trzy fazy. Pierwsza – pierwotna (I stopnia) polega na kontrolowaniu czynników ryzyka oraz zapobieganiu chorobom i urazom. Druga - profilaktyka wtórna (II stopnia) obejmuje wczesną diagnostykę oraz leczenie chorób i uszkodzeń ciała, w tym natychmiastowe wdrożenie odpowiedniej terapii celem szybkiego powrotu do sprawności. Trzecia - profilaktyka III stopnia jest prewencją mającą na celu zapobiegnięcie skutkom przebytej choroby/urazu, przeciwdziałanie powrotom oraz korekcję obecnych po urazie kompensacji [Grygorowicz 2010].

6.2. Cel stosowania profilaktyki uszkodzeń układu ruchu u pilotów

Silne i prawidłowo funkcjonujące ciało musi być zarówno mobilne, jak i stabilne [Wood 2022]. Zaburzenia powstające w obrębie motoryki podstawowej (mobilność, stabilność, propriocepcja) doprowadzają do pojawiania się kompensacji i dysbalansu mięśniowego stanowiąc czynnik urazu oraz nieefektywne budowanie wyższych zdolności motorycznych takich jak siła, wytrzymałość, szybkość oraz moc [Bagherian 2019]. Destrukcyjne czynniki zewnętrzne powodują, iż niezbędnym dla pilota wojskowego jest stosowanie profilaktyki uszkodzeń układu ruchu. Musi on przez całą swoją drogę zawodową zachowywać idealne zdrowie oraz wysoką sprawność psychofizyczną, gdyż przeciążenie organizmu pracą naraża pilota na problemy układu ruchu w postaci bólu kręgosłupa, stanu ogólnego przeciążenia ustroju czy zwyrodnieniowe stawów obwodowych.

6.3. Istotne elementy profilaktyki

Pierwszym aspektem profilaktyki uszkodzeń układu ruchu pilota wojskowego jest przeciwdziałanie zaburzeniom motoryki podstawowej wynikającym z przyjmowanej pozycji w statku powietrznym. Obejmuje pracę nad mobilnością, stabilnością oraz propriocepcją. Mobilność to możliwość wykonania pełnego ruchu w stawie bez widocznej kompensacji. Składa się na nią praca elementów budujących staw wraz z mięśniami otaczającymi, a sam ruch wykonywany jest dzięki impulsom generowanym w centralnym układzie nerwowym, które następnie przekazywane są obwodowo do mięśni i pozostałych tkanek. Nieprawidłowa praca choć jednego elementu składającego się na mobilność powoduje zaburzoną pracę wszystkich pozostałych części ponieważ inne struktury muszą przejąć funkcje uszkodzonego elementu i pojawiają się kompensacje. Stabilność to aktywna kontrola mięśniowa położenia stawu, pokazuje w jaki sposób ciało zarządza działającymi napięciami biomechanicznymi. Pozwala na ruch kontrolowany, czyli bezpieczny, zarówno w statyce (np. stanie na jednej nodze), jak i w dynamice (np. podczas biegu). Propriocepcja (kinestezja), to zdolność organizmu do określania położenia ciała w przestrzeni. Proprioceptory, czyli receptory czucia głębokiego kontrolują pionowe ustawienie ciała w przestrzeni. Znajdują się w obrębie elementów narządu ruchu takich jak mięśnie, ścięgna, więzadła, a ich zadaniem jest kontrola zmiany napięcia i długości mięśni, zmiany kątów stawowych i nacisku stóp na podłoże. Odbierają informacje dotyczące położenia ciała w przestrzeni oraz segmentów ciała i ich ruchów wobec siebie. Reagują na zmiany napięcia mięśni informując centralny układ nerwowy o położeniu ciała i wykonywanym ruchu [Sozański 2019, Cook 2015, Elphinston 2016].

6.4. Konsekwencje braku profilaktyki

Wielogodzinne przebywanie w pozycji siedzącej powoduje dysbalans mięśniowy w obrębie, które to odgrywają znaczącą rolę w obrębie łańcucha kinematycznego, stabilizacji tułowia i miednicy. Nadmierne skrócenie prostowników biodra przyczynia się do przeciążeń i pojawiających się w związku z tym dolegliwości bólowych odcinka lędźwiowego kręgosłupa. Podobnie, zaburzona praca przepony oraz niewłaściwe ciśnienie śródbrzusze przeciąża odcinek lędźwiowy kręgosłupa, dlatego bardzo ważne dla odpowiedniej stabilności są ćwiczenia przepony [Akuthota 2004]. Głowa obciążona goglami oraz hełmem noktowizyjnym przeciąża odcinek szyjny kręgosłupa oraz obręcz ramienną, co także skutkuje bólami w tych segmentach ciała. Niezbędne jest więc wprowadzenie do codziennej aktywności ćwiczeń funkcjonalnych, zawierających wszystkie elementy motoryki podstawowej celem przeciwdziałania powstającym zaburzeniom w układzie ruchu pilota wojskowego.

7. PODSUMOWANIE

Przestrzeganie zasad ergonomii pracy i wypoczynku może znacząco ustrzec układ ruchu przed nadmiernym przeciążeniem. Wymaga to ukształtowania odpowiednich nawyków oraz wzorców ruchowych, a także świadomej aktywacji mięśni tułowia celem uzyskania odpowiedniej stabilności kręgosłupa. Tułów jest podstawą, która ma za zadanie kontrolować zaburzenia równowagi ciała poprzez odpowiednie przenoszenie masy ciała oraz środka ciężkości, zaś właściwe ułożenie głowy i szyi znacznie reguluje postawę całego. Brak stosowania profilaktyki uszkodzeń układu ruchu doprowadza do osłabienia łańcucha kinematycznego organizmu, przeciążeń i ruchów kompensacyjnych, które są bezpośrednią drogą do uszkodzenia. Błędne wzorce ruchowe wymagają korekcji, a tak obciążająca praca w przestrzeni powietrznej wymaga połączenia różnych form treningu celem zachowania balansu wewnątrz-ustrojowego.

LITERATURA

1. Akuthota V., Nadler SF., 2004, Core strengthening, *Arch Phys Med Rehabil*, nr 85, s. 86–92.
2. Bagherian S., Ghasempoor K., Rahnama N., Wikstrom EA., 2019, The Effect of Core Stability Training on Functional Movement Patterns in College Athletes. *Journal of Sport Rehabilitation*, nr 28, s. 444-449.
3. Błaszczuk JW., 1993, Kontrola stabilności postawy ciała, *KOSMOS*, nr 42, s. 473-486.
4. Błaszczuk JW., Czerwosz L., 2005, Stabilność posturalna w procesie starzenia, *Gerontologia Polska*, nr 13, s. 25-36.
5. Czaprowski D., Leszczewska J., Sitarski D., 2014, Czy istnieje „idealna” pozycja siedząca? *Postępy Rehabilitacji*, nr 3, s. 47-54.
6. Cook G., 2015, *Movement. Functional Movement System. Screening-Assessment-Corrective Strategies*. Santa Cruz, California.
7. Elphinston J., 2016, Stabilność, sport oraz wydajność ruchowa. *Biomechanika praktyczna i systematyczny trening dla osiągnięcia wydajności ruchowej i zapobiegania urazom*, WSEiT and Galilea Press.
8. Grygorowicz M., 2010, Kompleksowa ocena fizjoterapeutyczna podstawą profilaktyki pierwotnej urazów sportowych, *Nowiny Lekarskie* nr 79, s. 240–244.
9. Jędrus R., Byszka M., Kowalczyk K., 2020, *Kondycyjno-sprawnościowe przygotowanie do lotów*. Wydawnictwo Lotniczej Akademii Wojskowej. Dęblin.
10. Kaczor S., Bac A., Brewczyńska P., Woźniacka R., Golec E., 2011, Występowanie dolegliwości bólowych dolnego odcinka kręgosłupa i nawyków ruchowych u osób prowadzących siedzący tryb życia, *Postępy Rehabilitacji*, nr 3, s. 19-28.

11. Kattenbach A., 2016, Środowisko pracy pilota wojskowego, *Annales Universitatis Mariae Curie – Skłodowska, Sectio J. Paedagogia-Psychologia*, nr 29, s. 183-191.
12. Klukowski K., Kurek Z., 2009, Odnowa biologiczna pilotów – moda czy konieczność?, *Fizjoterapia*, nr 17, s. 56-61.
13. Kocjan J., Adamek M., Gzik-Zroska B., Czyżewski D., Rydel M., 2017, Network of breathing. Multifunctional role of the diaphragm: a review. *Adv. Respir. Med.*, nr 85, s. 224–232.
14. Paloetti S., 2012, *Przepona i jej struktury*, Elsevier Ltd.
15. Regulamin Lotów Lotnictwa Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej (RL-2016), Ministerstwo Obrony Narodowej. Dowództwo Generale Rodzajów Sił Zbrojnych. SPow.19/2016.
16. Schunke M., Schulte E., Schumacher U., Voll M., Wesker K., 2015, *Prometeusz. Atlas anatomii człowieka. Anatomia ogólna i układ mięśniowo-szkieletowy*, MedPharm Polska, Wrocław.
17. Sozański H., 1999, *Podstawy teorii treningu sportowego*, Centralny Ośrodek Sportu, Warszawa.
18. Wierzejska J., 2022, Oczekiwania zawodowe pilotów wojskowych a ich nadzieje na sukces, *Annales Universitatis Mariae Curie – Skłodowska. Sectio J. Paedagogia-Psychologia*, nr 29, s:131-152.
19. Wood S., 2022, *Pilates w rehabilitacji*, PZWL, Warszawa.

BODY POSTURE AND POSTURE DISORDERS IN MILITARY PILOTS

Abstract

The Sedentary lifestyle is currently mentioned as one of the factors that disorders body posture and is causing back pain. A military pilot works in an environment that stresses the musculoskeletal system: rapid changes in altitude, acceleration, noise, vibrations, changes in atmospheric pressure, hypoxia, working with unfavorable distribution of instruments on the board, forced body position in an aircraft seat and the need to use an aviation helmet and goggles night vision devices in flight. Destructive external factors make it necessary for a military pilot to use prophylaxis of motor system damage, and its important element is the introduction of functional exercises to everyday activity, containing all elements of basic motor skills (mobility, stability, proprioception).

Keywords: military pilots, body posture, core stability, prevention

Sławomir STEPIEŃ *

Mariusz WESOŁOWSKI**

Agnieszka WRÓBLEWSKA ***

OPTYMALNY SYSTEM POZYCJONOWANIA I STABILIZACJI DRONÓW W ZASTOSOWANIACH MILITARNYCH

W pracy opisano system sterowania bezzałogowego wielowirnikowego statku powietrznego (ang. Unmanned Aerial Vehicle - UAV) wykorzystujący łączoną technikę sterowania proporcjonalno-całkowo-różniczkową (ang. Proportional-Derivative-Integral - PID) i technikę regulacji z kompensacją w sprzężeniu zwrotnym zwaną techniką zależnego od stanu równania Riccatiego (ang. State-Dependent Riccati Equation - SDRE). Regulatory PID i SDRE są stosowane w hybrydowym systemie sterowania do precyzyjnego sterowania i stabilizacji, niezbędnego do zapewnienia stabilności lotu drona i precyzji manewrów. Połączenie zalet sterowania PID i SDRE daje znaczną poprawę jakości sterowania, przy zachowaniu prostoty systemu regulacji. Ponadto umożliwia śledzenie położenia UAV w nieskończonym jak i skończonym czasie. Zamieszczone przykłady oraz testy dotyczące wymienionych technik sterowania, potwierdzają jego przydatność i skuteczność, która może być z sukcesem wykorzystana w zastosowaniach militarnych.

Słowa kluczowe: Bezzałogowe Statki Powietrzne, Sterowanie Optymalne, Regulacja SDRE, Regulacja PID

1. WPROWADZENIE

Bezzałogowe Statki Powietrzne (ang. Unmanned Aerial Vehicles – UAV) można podzielić na dwie grupy: statki sterowane zdalnie i autonomiczne. Statki zdalnie sterowane pozwalają wyeliminować działanie pilota, jednak wymagają zaangażowania

* Instytut Automatyki i Robotyki, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań.

** Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa.

*** Instytut Energetyki Ciepłej, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań.

naziemnego operatora, natomiast statki autonomiczne eliminują działanie urządzenia również spod kontroli ludzkiego operatora.

Ze względu na ich zasięg, czas działania i możliwości osiągnięcia dużych pułapów praktycznych, UAV zwiększają zdolności militarne w stosunku do bezzałogowych systemów pilotowanych. Z tych powodów bezzałogowe statki powietrzne mogą wykonywać zadania trudniejsze niż systemy załogowe, takie jak np. atakowanie obiektów dysponujących bronią chemiczną i biologiczną oraz niszczenie obrony powietrznej nieprzeciwnika, które stają się dzisiaj problemami krytycznymi [Glade 2000, RTO/NATO 2000].

Istnieje wiele ról, które UAV mogą pełnić w operacjach wojskowych. Najważniejsze z nich to:

- transport,
- wywiad, nadzór i rozpoznanie,
- atak na cele stałe i mobilne,
- niszczenie celów powietrznych,
- misje wsparcia bojowego.

W zakresie misji transportowych, UAV mogą dziś przewozić ładunki, w stosunkowo niewielkich ilościach, które mają zastosowanie w sytuacjach taktycznych. Obecny stan technologii jest wystarczający do budowy zdalnie sterowanych lub autonomicznych statków jedno lub wielowirnikowych - dronów, które są w stanie dostarczać zaopatrzenie i amunicję żołnierzom w terenie.

O wiele bardziej praktyczne jest wykorzystanie UAV do misji wywiadowczych, rozpoznawczych i obserwacyjnych. UAV mogą utrzymywać się w powietrzu przez długi czas, mogą być elastycznie nawigowane w pobliżu potencjalnych celów, są małe i stosunkowo trudne do wykrycia. Długi czas operowania bezzałogowych statków powietrznych jest szczególnie ważny dla nadzoru, gdy operacje te mogą być prowadzone przez wiele godzin, a nawet kilka dni. W ten sposób UAV stają się alternatywą do statków załogowych pod względem konieczności długotrwałego utrzymania wysokiego tempa operacyjnego, co jest praktycznie normą we współczesnych sytuacjach wojskowych.

Wykorzystanie do niszczenia obiektów stałych lub mobilnych wiąże się z zaangażowaniem UAV do celów obserwacyjnych oraz UAV wyposażonych w precyzyjną broń kierowaną. Po wykryciu lokalizacji, rodzaju celu i wymaganego uzbrojenia, dowódca lub odpowiedni algorytm sterujący określa sposób ataku na cel. Natomiast atak na cele mobilne wiąże się z wykorzystaniem zaawansowanej sensoryki oraz odpowiednio uzbrojonych głowic z bronią kierowaną lub manewrującą. Dużą rolę odgrywa tu wykrywanie i identyfikacja celów w operacjach bojowych.

W zakresie walk powietrznych, prowadzone są ofensywne i defensywne operacje bojowe przeciwko samolotom, pociskom manewrującym i pociskom balistycznym. Natomiast w przypadku misji wsparcia bojowego, wykorzystanie UAV ogranicza się do operacji wsparcia, wykonywanych przez samoloty uderzeniowe i bombowce.

Wymienione zastosowania i potrzeby wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych stały się przyczyną rozwoju prac nad budową i sterowaniem coraz to nowszych i bardziej zaawansowanych technologicznie jedno – lub wielowirnikowych systemów latających, którego jednym z najważniejszych elementów jest system kontroli, który powinien posiadać cechy optymalności i wysokiej inteligencji [Chodnicki et al. 2022, Open Society Foundations 2019].

Ponieważ sterowanie lotem wielozadaniowych UAV jest postrzegane jako trudny obszar inżynierii lotniczej [Kozera 2018], ponadto każdy system sterowania statku powietrznego jest w istocie nieliniowy i sprzężony, wbudowany kontroler powinien zatem być niezależnym systemem, którego celem jest stworzenie najlepszego autopilota. Większość obecnie istniejących sterowników opiera się na sterownikach PID [RTO/NATO, 2000].

Współczesna teoria sterowania optymalnego proponuje wysokowydajną i szybko rozwijającą się technikę sterowania zwaną zależną od stanu regulacją wykorzystującą równanie Riccatiego (ang. State-Dependent Riccati Equation - SDRE) [Banks et al. 2018]. Jest to suboptymalna metoda sterowania dedykowana dla systemów nieliniowych.

Wykorzystuje ona bezpośrednią parametryzację, prowadzącą układ nieliniowy do struktury liniowej o współczynnikach zależnych od stanu (ang. State-Dependent Coefficients - SDC). Sterowanie SDRE jest następnie rozwiązywane zgodnie ze zmianą trajektorii stanu w celu uzyskania nieliniowej macierzy kontrolera sprzężenia zwrotnego, która to stanowi rozwiązanie problemu [Cimen 2010, Cloutier, D'Souza i Mracek 1996].

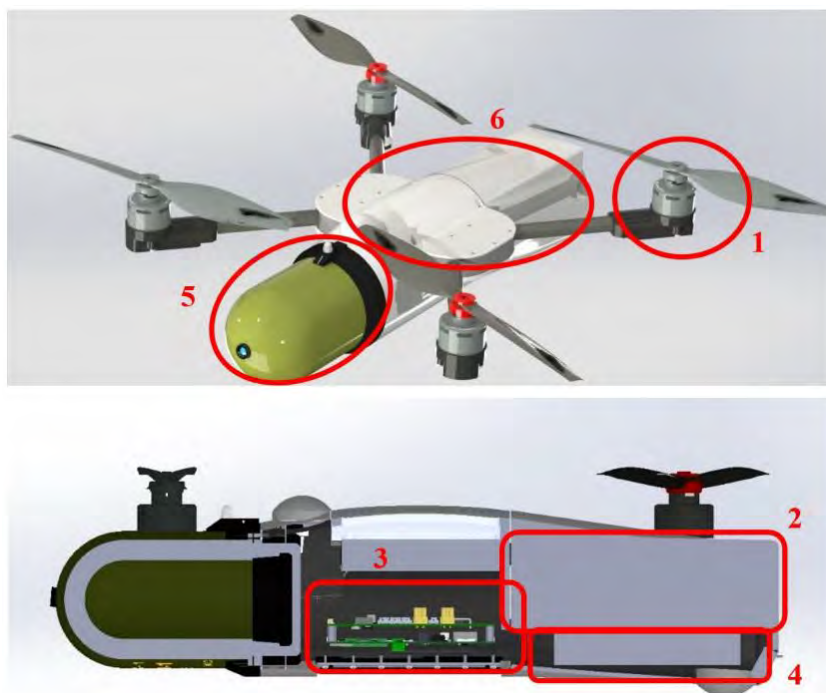
W niniejszej pracy pokazano metodę sterowania orientacją wielowirnikowego statku powietrznego z wykorzystaniem optymalnego stabilizatora prędkości. Nowym wkładem w rozwój metod sterowania dronami jest opracowanie systemu sterowania PID-SDRE w pętli zamkniętej wykorzystującego model UAV o sześciu stopniach swobody (ang. six Degree of Freedom - 6 DoF). PID jako główny kontroler służy do sterowania położeniem kątowym. Wewnętrzny podkontroler prędkości SDRE służy do stabilizacji kątowej i liniowej regulacji prędkości.

W pracy przedstawiono metodologię modelowania i projektowania sterowania optymalnego kontrolera lotu dla UAV. Przedstawiono w niej nieliniowy model drona i rozwiązanie problemu optymalnej kontroli prędkości w skończonym i nieskończonym horyzoncie czasowym. Następnie przedstawiono analizę i porównie wyników dla systemów z - oraz bez wykorzystania optymalnego regulatora SDRE.

2. MODEL WIELOWIRNIKOWEGO UAV

W modelowaniu matematycznym bezzałogowych statków powietrznych, konstrukcję mechaniczną traktuje się jako ciało sztywne o masie znajdującej się w środku

ciężkości i masą każdej z czterech jednostek napędowych umieszczonych symetrycznie w ramie krzyżowej. Uzyskane równania dynamiki są równaniami różniczkowymi stanu quadrotora. Natomiast, biorąc pod uwagę kształt drona (Rys. 1) i jego konfigurację, równania dynamiki ruchu zapisuje się w konwencji NED (ang. North-East-Down), w odniesieniu do osi obserwatora stosuje się układ współrzędnych globalny (tzw. układ związany z Ziemią – ang. Earth Frame {EF}). W tej konwencji oś x lokalnego układu współrzędnych UAV (ang. Body Frame - {BF}) jest zgodna z kierunkiem kamery, a oś z skierowana jest w dół. Na Rys. 1 pokazano statek powietrzny w wersji obserwacyjno-bojowej [Chodnicki 2019], którego model wykorzystano do analizy opisywanego systemu sterowania.



Rys. 1. Wielowirnikowy statek powietrzny – widok oraz przekrój boczny

Jak można zauważyć, UAV został wyposażony w głowicę bojową, co czyni go bronią precyzyjnego rażenia (systemem rozpoznawczo – uderzeniowym). Jest on zbudowany z sześciu głównych podzespołów: 1. układu napędowego, w którego skład wchodzi: silnik bezszczotkowy (BLDC), śmigło oraz sterownik silnika BLDC; 2. akumulatora; 3. awioniki pokładowej, w której skład wchodzi: układ przetwarzania energii, system stabilizacji i kontroli lotu, układ przetwarzania obrazu odpowiedzialny za wizyjne śledzenie obiektu; 4. systemu łączności bezprzewodowej; 5. głowicy bojowej z kamerą; 6. kompozytowego kadłuba.

Dynamika quadrotora jest ogólnie definiowana za pomocą równań sił i momentów, zgodnie z zasadą dynamiki Newtona:

$$F = m(\dot{v} + \omega \times v) \tag{1}$$

$$m = I\dot{\omega} + \omega \times I\omega \tag{2}$$

gdzie:

m – masa statku

v – wektor prędkości liniowej

ω – wektor prędkości obrotowej

I – macierz bezwładności statku

Definiując wektory prędkości we współrzędnych kartezjańskich x, y, z oraz sferycznych ϕ, θ, ψ

$$v = [u \quad v \quad w]^T \text{ oraz } \omega = [p \quad q \quad r]^T, \tag{3}$$

określając bezwładność statku jako macierz diagonalną ze względu na jego symetrię

$$I = \text{diag}(I_x, I_y, I_z), \tag{4}$$

wówczas nieliniowy układ równań stanu, który opisuje dynamikę pokazanego UAV i uwzględnia grawitację g wraz z siłą ciągu F_T jest następujący:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rv - qw + g \sin \theta + \frac{1}{m} F_x \\ pw - ru - g \sin \phi \cos \theta + \frac{1}{m} F_y \\ qu - pv - g \cos \phi \cos \theta + \frac{1}{m} (F_T + F_z) \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(I_z - I_y)rq + M_x / I_x \\ -(I_x - I_z)pr + M_y / I_y \\ -(I_y - I_x)pq + M_z / I_z \end{bmatrix}, \tag{6}$$

gdzie:

F_x, F_y, F_z – siły działająca na dron

M_x, M_y, M_z – momenty wytworzone przez napędy

Związek kinematyczny pomiędzy prędkościami kątowymi statku wiążący układy lokalny {BF} oraz układ odniesienia {EF} można zapisać następująco:

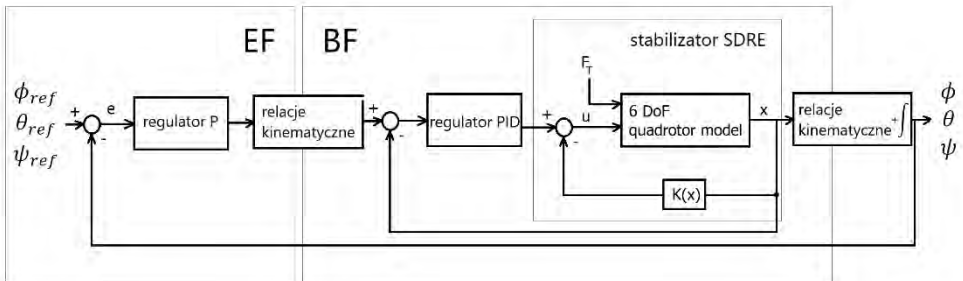
$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \tag{7}$$

3. SYSTEM STEROWANIA

3.1. Regulator orientacji P-PID z systemem optymalnej stabilizacji SDRE

Quadrotor jest obiektem niestabilnym. Dlatego system sterowania powinien zawierać wbudowany skuteczny system stabilizacji taki, aby odpowiedź obiektu na sterowanie była szybka i nie zawierała przeregulowań. Z tego powodu proponuje się dwa bloki sterowników: jeden do kontrolowania orientacji statku, a drugi do stabilizacji prędkości kątowych. Wymagania te można osiągnąć za pomocą regulatora położenia kąтового P sprzężonego ze stabilizatorami PID. Jednak zastosowanie sterowników typu PID wymaga precyzyjnego dostrojenia w celu osiągnięcia optymalnej wydajności systemu sterowania. Dlatego lepszym pomysłem jest zastosowanie rozwiązania sprzężonego PID-SDRE lub w pełni zintegrowanego sterownika SDRE, który nie musi być optymalizowany. W związku z tym, niniejszy artykuł dotyczy hybrydowego sterownika PID-SDRE dedykowanego do kontroli orientacji i stabilizacji ze skończonym oraz nieskończonym horyzontem czasowym. Schemat systemu sterowania przedstawiono na Rys. 2.

Jak pokazano na rysunku, sterownik składa się z trzech jednostek sterujących. System kontroli orientacji jest zaimplementowany w zewnętrznej pętli z regulatorem typu P, ale problem stabilizacji prędkości jest wykonywany przez podsystem z wewnętrzną pętlą i sterownikiem PID wraz z kompensatorem w sprzężeniu zwrotnym wykorzystującym technikę SDRE.



Rys. 2. Schemat układu sterowania PID-SDRE

W tym przypadku siła ciągu F_T jest ustawiana jako stała i pozwala uzyskać pożądaną wysokość. Pozostałe zmienne zawarte na Rys. 2 oznaczają:

$x = [v \quad \omega]^T$ – wektor stanu modelu

$u = [M_x \quad M_y \quad M_z]^T$ – wektor sterowania

$e = [\varphi - \varphi_{ref} \quad \theta - \theta_{ref} \quad \psi - \psi_{ref}]^T$ – wektor błędów sterowania

3.2. Regulator orientacji P-PID

Układ sterowania przedstawiony na Rys. 2 zawiera dwa sterowniki, jeden umieszczony w pętli głównej sterownik P do kontroli położenia kąowego drona i drugi umieszczony w pętli wewnętrznej, regulator PID do regulacji prędkości kąowej (zapewniający stabilizację). Regulator PID służy do stabilizacji prędkości, czyli regulacji położenia kąowego do zera. Prawo sterowania dla głównego kontrolera P można przedstawić następująco:

$$u_P = \begin{bmatrix} (e_\varphi - e_\psi \sin \varphi)k_{p\varphi} \\ (e_\theta \cos \varphi - e_\psi \sin \varphi \cos \theta)k_{p\theta} \\ (e_\psi \cos \varphi \cos \theta - e_\theta \sin \varphi)k_{p\psi} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

gdzie $e = [e_\varphi \quad e_\theta \quad e_\psi]^T$ to wektor sygnału błędu podawany do sterownika P, natomiast $k_{p\varphi}$, $k_{p\theta}$ oraz $k_{p\psi}$ są nastawami wzmocnień regulatora. W praktyce przeskalowane sygnały błędu orientacji przez wzmocnienia regulatora P, stanowią rodzaj quasiprędkości, która stanowi wejście regulatora PID. Regulator PID używany jest do stabilizacji quadrotora składa się z trzech niezależnych sterowników prędkości. Sygnał wyjściowy regulatora PID jest obliczany w sposób:

$$u_{PID} = k_P \omega + k_I \int \omega dt + k_D \frac{d\omega}{dt}, \quad (9)$$

gdzie k_P , k_I oraz k_D są diagonalnymi macierzami wzmocnień regulatora [Chodnicki 2019].

3.3. Optymalny stabilizator SDRE

Metoda sterowania SDRE (ang. State-Dependent Riccati Equation - SDRE) dedykowana dla układów nieliniowych polega na optymalnej regulacji z kompensacją w sprzężeniu zwrotnym przy jednoczesnej minimalizacji całkowitego wskaźnika jakości. Metoda ta okazuje się skutecznym narzędziem do sterowania orientacją nieliniowego modelu czterowirnikowego UAV. Technika ta jest cały czas rozwijana i szeroko opisana w najnowszej literaturze [Banks et al. 2018, Cimen 2010, Cloutier, D'Souza i Mracek 1996]. Podejście SDRE jest stosowane w kontekście problemu sterownika nieliniowego z kwadratową funkcją jakości, definiowaną jako suma strat energii w obiekcie i energii dostarczonej do systemu, co jest zgodne z praktycznymi zastosowaniami. Rozróżnia się dwa typy sterowania SDRE: ze skończonym horyzontem czasowym oraz nieskończonym horyzontem czasowym.

Sterownie SDRE ze skończonym horyzontem czasowym polega na znalezieniu takiego sterowania, które minimalizuje następujący wskaźnik, przy określonym czasie regulacji t_f

$$J(u) = \frac{1}{2} x(t_f)^T S(x(t_f)) x(t_f) + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (x^T Q(x)x + u^T R(x)u) dt, \quad (10)$$

systemu nieliniowego z odseparowanym wejściem

$$\dot{x} = F(x) + B(x)u, \quad (11)$$

który można zapisać w formie zależnej od stanu postaci sparametryzowanej SDC (ang. State-Dependent Coefficient form)

$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u. \quad (12)$$

We wskaźniku (10), macierz $Q(x)$ jest macierzą symetryczną dodatnio półokreśloną, $R(x)$ jest macierzą dodatnio określoną natomiast $S(x(t_f))$, podobnie jak $Q(x)$, jest również macierzą symetryczną dodatnio półokreśloną. Równanie (11) zawiera wektor $F(x)$, który jest funkcją ciągłą i spełnia warunki Lipschitz'a.

Para macierzy $\{A(x), B(x)\}$ w równaniu (12) stanowi parametryzację stabilną, to znaczy, że system (12) powinien być sterowalny dla każdego stanu x .

Stosując rachunek Hamiltona-Jacobiego-Bellmana, uzyskuje się następujące prawo sterowania optymalnego:

$$u_{SDRE} = -R^{-1}(x)B^T(x)K(x)x, \quad (13)$$

gdzie $K(x)$ jest macierzą wzmocnień kompensatora w sprzężeniu zwrotnym układu regulacji SDRE, która wyznaczana jest z zależnego od stanu równania różniczkowego Riccatiego (ang. State-Dependent Differential Riccati Equation - SDDRE):

$$\begin{aligned} & \dot{K}(x) + K(x)A(x) + A^T(x)K(x) + \\ & -K(x)B(x)R^{-1}(x)B^T(x)K(x) + Q(x) = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

W przypadku sterownia SDRE z nieskończonym horyzontem czasowym, metoda polega na znalezieniu takiego sterowania, które minimalizuje wskaźnik (10) dla czasu regulacji $t_f \rightarrow \infty$. Wówczas wskaźnik (10) przyjmuje postać:

$$J(u) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q(x)x + u^T R(x)u) dt, \quad (15)$$

natomiast wzmocnienie $K(x)$ w prawie sterowania (13) uzyskuje się w wyniku rozwiązania zależnego od stanu algebraicznego równania Riccatiego (ang. State-Dependent Algebraic Riccati Equation - SDARE):

$$K(x)A(x) + A^T(x)K(x) - K(x)B(x)R^{-1}(x)B^T(x)K(x) + Q(x) = 0. \quad (16)$$

Dla omawianych w niniejszej pracy, systemów statków powietrznych wielowirnikowych, ze względu na skomplikowaną dynamikę, uzyskanie rozwiązania równań SDDRE (14) lub SDARE (16) nie jest rzeczą prostą. Szczególnie dla równania (16), rozwiązanie SDARE wymaga zastosowania zaawansowanych numerycznych metod obliczeniowych, takich jak np.: metoda szeregów Taylora, metoda interpolacyjna itd. [Banks et al. 2018].

W zastosowaniach praktycznych, dzięki zastosowaniu szybkich procesorów sygnałowych, możliwa jest implementacja wymienionych technik w rzeczywistych systemach sterowania. Duża moc obliczeniowa procesorów i ich predkość pozwala sterować statkami powietrznymi w sposób optymalny, w czasie rzeczywistym.

4. EKSPERYMENTY I TESTY OBLICZENIOWE

Do testów i analizy opracowanego systemu sterowania wykorzystano model wielowirnikowego statku powietrznego pokazanego na Rys. 1. Quadrotor został skonstruowany przez pracowników Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych w Warszawie [www.itwl.pl]. Analizę opracowanego sterowania PID-SDRE wykonano w dwóch trybach pracy regulatora SDRE:

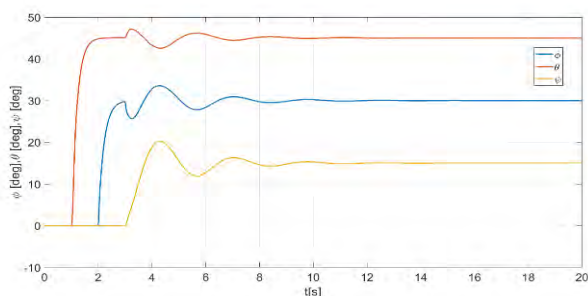
- w nieskończonym horyzoncie czasowym,
- w skończonym horyzoncie czasowym.

4.1. Regulacja w trybie z nieskończonym horyzontem czasowym

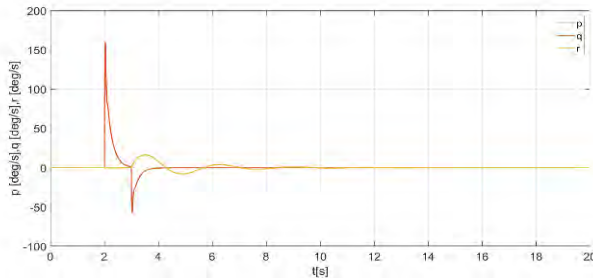
W pierwszej części eksperymentu skuteczności i przydatności sterowania PID-SDRE wykonano analizę regulacji optymalnej orientacji drona (ang. attitude), czyli pozycjonowania kąowego w powietrzu z nieskończonym horyzontem czasowym. Aby wykazać przydatność stabilizatora SDRE, najpierw wykonano testy sterowania przy wykorzystaniu samego regulatora PID, następnie do testów włączono kompensator SDRE. W tym celu wykorzystano prawo sterowania (13) oraz wskaźnik (15). Przyjęto następujące wartości kątów orientacji odniesienia: $\theta_{ref} = 45^\circ$, $\varphi_{ref} = 30^\circ$, $\psi_{ref} = 15^\circ$ oraz prędkości: $p_{ref} = q_{ref} = r_{ref} = 0^\circ/s$ dla następujących parametrów regulatora

- P: $k_{p\varphi} = 10$, $k_{p\theta} = 10$, $k_{p\psi} = 20$;
- PID: $k_p = \text{diag}(0,3; 0,3; 0,3)$, $k_i = \text{diag}(0,1; 0,1; 0,1)$, $k_D = \text{diag}(0,001; 0,001; 0)$;
- SDRE: $Q = 100 \cdot I_{6 \times 6}$ oraz $R = 0,5 \cdot I_{6 \times 6}$.

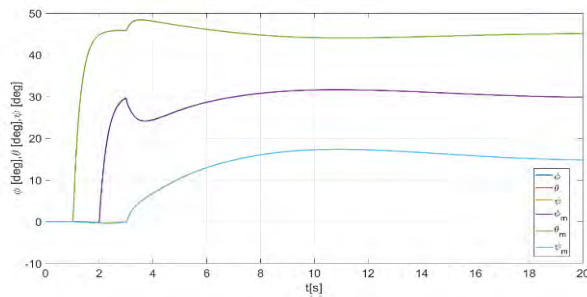
Na poniższych wykresach zamieszczono uzyskane przebiegi pozycji kąowych statku oraz prędkości.



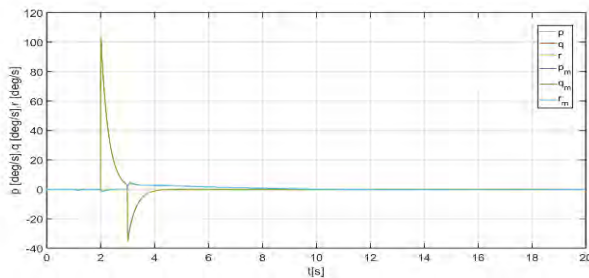
Rys. 3. Przebiegi pozycji kąowych – regulacja PID



Rys. 4. Przebiegi prędkości kątowych – regulacja PID



Rys. 5. Przebiegi pozycji kątowych – regulacja PID-SDRE



Rys. 6. Przebiegi prędkości kątowych – regulacja PID-SDRE

Rysunki 3-4 przedstawiają odpowiedzi pozycjonowania kąowego oraz prędkości obrotowych statku dla wymaganej orientacji referencyjnej programowanej sekwencyjnie co 1 sekundę. Ze względu na to, iż sterownik pracował w trybie regulacji PID (bez kompensacji SDRE), widoczne są spore przeregulowania i duże wartości chwilowe prędkości obrotowych statku.

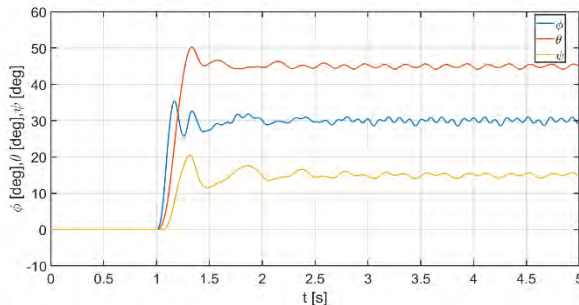
Analiza proponowanej metody sterowania PID-SDRE, której wyniki pokazano na Rys. 5-6 pokazuje, że quadrotor może być z powodzeniem sterowany do zadanej orientacji referencyjnej, zerując prędkość kątową i redukując przeregulowania wraz z chwilowymi wartościami prędkości kątowej. Zastosowanie stabilizatora SDRE w sterowaniu potwierdza przydatność i poprawność prezentowanej i stosowanej techniki.

4.2. Regulacja w trybie ze skończonym horyzontem czasowym

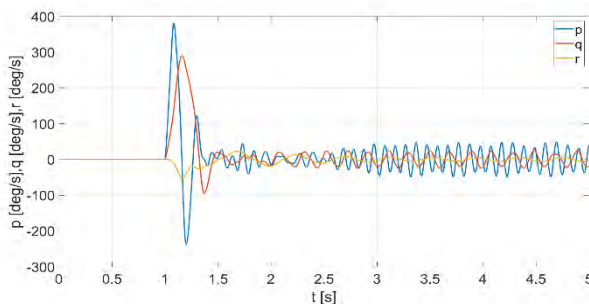
W drugiej części eksperymentu również wykonano analizę regulacji orientacji omawianego statku powietrznego (ang. attitude control), czyli pozycjonowania kąto-
wego ze skończonym horyzontem czasowym. Aby wykazać przydatność stabilizatora SDRE, najpierw wykonano testy sterowania przy wykorzystaniu samego regulatora PID, następnie do testów włączono kompensator SDRE, w którym przyjęto czas regu-
lacji $t_f = 2$ sek. W tym celu wykorzystano prawo sterowania (13) oraz wskaźnik (10). Podobnie jak w przypadku poprzednim, przyjęto następujące wartości kątów orientacji odniesienia: $\theta_{ref} = 45^\circ$, $\varphi_{ref} = 30^\circ$, $\psi_{ref} = 15^\circ$ oraz prędkości: $p_{ref} = q_{ref} = r_{ref} = 0^\circ/s$ dla następujących parametrów regulatora

- P: $k_{p\varphi} = 10$, $k_{p\theta} = 20$, $k_{p\psi} = 100$;
- PID: $k_p = \text{diag}(0,3; 0,3; 0,3)$, $k_i = \text{diag}(0,1; 0,1; 0,1)$, $k_D = \text{diag}(0,01; 0,01; 0)$;
- SDRE: $S = 2 \cdot I_{6 \times 6}$, $Q = 0,5 \cdot I_{6 \times 6}$ oraz $R = 0,1 \cdot I_{6 \times 6}$.

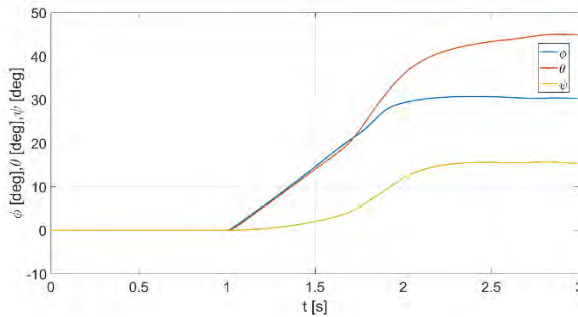
Na poniższych wykresach zamieszczono uzyskane przebiegi pozycji kątowych statku oraz prędkości.



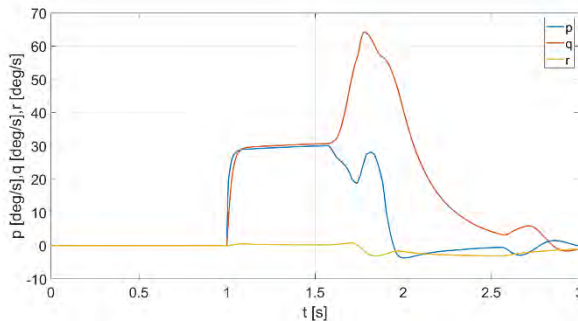
Rys. 7. Przebiegi pozycji kątowych – regulacja PID



Rys. 8. Przebiegi prędkości kątowych – regulacja PID



Rys. 9. Przebiegi pozycji kątowych – regulacja PID-SDRE dla $t_f = 2$ sek



Rys. 10. Przebiegi prędkości kątowych – regulacja PID-SDRE dla $t_f = 2$ sek

Analiza i porównanie sterowania przedstawione na Rys. 7-10, potwierdza przydatność zastosowania kompensatora SDRE w sterowaniu drona. Oprócz redukcji oscylacji i stabilizacji statku, możliwe jest podanie czasu regulacji (zerowania) prędkości kątowych i orientacji statku. Możliwość sterowania w zadanym czasie jest tutaj bardzo dużą zaletą, gdyż zwiększa możliwości manewrujące statku i pozwala dostosować możliwości regulacji do specjalnych zadań bojowo-obszaryjnych związanych z naprowadzaniem głowicy na cele statyczne lub poruszające się nawet z dużą dynamiką.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono technikę sterowania PID-SDRE statków powietrznych wielowirnikowych o przeznaczeniu bojowo-obszaryjnym dla problemu regulacji orientacji z nieskończonym, jak również ze skończonym horyzontem czasowym. Technika wykorzystuje nieliniowy model sparametryzowany o sześciu stopniach swobody (ang. 6 DoF) bezzałogowego statku powietrznego (ang. UAV).

Przedstawione porównanie i analiza techniki sterowania P-PID z optymalnym nieliniowym stabilizatorem prędkości sprzężenia zwrotnego SDRE, wykonująca zadanie kontroli położenia i stabilizacji, wskazuje jednoznacznie na skuteczność prezentowanej techniki. Natomiast demonstracja na przykładzie numerycznym pokazuje, że proponowana technika może być sukcesywnie stosowana w systemach sterowania lotem UAV, gdy statek musi operować z dużą precyzją w przestrzeni powietrznej.

W ramach dalszych prac, rozpatruje się kolejny etap przeprowadzonych analiz i badań, czyli przygotowanie do zastosowania w rzeczywistym systemie sterowania wielowirnikowym UAV.

LITERATURA

1. Chodnicki M., 2019, Rozprawa Doktorska, ITWL Warszawa.
2. Kozera C. A., 2018, Military Use of Unmanned Aerial Vehicles – A Historical Study, Scientific and Technical Journal Safety & Defense, vol. 4, nr 1, s. 17-21.
3. Banks H.T., Lewis, B.M., Tran, H.T., 2018, Nonlinear feedback controllers and compensators: a state-dependent Riccati equation approach. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, nr 4, s. 3813–3820.
4. Cimen T., 2010, Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the state-dependent Riccati equation (SDRE) method. Annual Reviews in Control, vol. 34, nr 1, s. 32–51.
5. Cloutier J.R., D'Souza C.N., Mracek C.P., 1996, Nonlinear regulation and nonlinear H_∞ control via the state-dependent Riccati equation technique: Part 1, Theory; Part 2, Examples. Proc. of the First International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace, s. 117–141.
6. Chodnicki M., Siemiatkowska B., Stecz W., Stępień S., 2022, Energy Efficient UAV Flight Control Method in an Environment with Obstacles and Gusts of Wind, Energies, vol. 15, nr 10, s. 3730.
7. Glade D., 2000, Unmanned Aerial Vehicles: Implications for Military Operations, Center for Strategy and Technology Air War College, Air University Maxwell Air Force Base, Alabama.
8. RTO/NATO, 2000, Flight Control Design – Best Practices, RTO TECHNICAL REPORT 29, <https://www.sto.nato.int> > RTO-TR-029 (dostęp 6.07.2021).
9. Open Society Foundations, 2019, Armed drones in Europe, London.
10. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, www.itwl.pl (dostęp 20.06.2022).

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was financially supported as a statutory work of the Poznan University of Technology (No. 0214/SBAD/0237)

**OPTIMAL SYSTEM FOR DRONE ATTITUDE CONTROL AND STABILIZATION
IN MILITARY APPLICATIONS****Abstract**

The paper presents an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) control system using a combination of the Proportional-Derivative-Integral (PID) control technique and a feedback compensation technique called the State-Dependent Riccati Equation (SDRE) approach. The PID-SDRE control system is used for precise control and stabilization, necessary to ensure the stability of the drone's flight and the precision of maneuvers. The combination of the advantages of PID and SDRE control results in a significant improvement in the the sense of the control quality, considering the simplicity of the control system. In addition, it allows to control of the UAV in infinite but also in finite time horizon. Presented numerical examples and tests confirm its usefulness and effectiveness, which can be successfully used in military applications.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, optimal control, State-Dependent Riccati Equation technique, Proportional-Integral-Derivative control.

Mariusz Z. WESOŁOWSKI*

Marek ADAMOWICZ**

Mariusz WESOŁOWSKI***

EKSPLOATACJA LINOWYCH URZĄDZEŃ AWARYJNEGO HAMOWANIA SAMOLOTÓW W SIŁACH ZBROJNYCH RP

Problematyka bezpieczeństwa jest nierozdzielnie związana z lotnictwem i stanowi jeden z najważniejszych aspektów jego funkcjonowania. W procesie zabezpieczenia operacji lotniczych uczestniczy wiele elementów, które można pogrupować w trzy grupy: człowiek, samolot i otoczenie. Każdy z nich odgrywa w tym procesie odmienną, lecz znaczącą rolę. Jednym z elementów tego procesu są **urządzenia awaryjnego hamowania samolotów**, które w przypadku niestandardowego przebiegu startu lub lądowania pozwalają na bezpieczne zatrzymanie kołującego statku powietrznego, ochraniając tym samym zdrowie jego załogi i mienie dużej wartości. Z tego powodu ich sprawność techniczna jest kluczowym elementem, od którego zależy poziom bezpieczeństwa zapewniany przez te urządzenia. W artykule autorzy przedstawili i szczegółowo omówili linowe urządzenia awaryjnego hamowania użytkowane w lotnictwie Sił Zbrojnych RP, a także wnioski wynikające z procesu ich wieloletniej eksploatacji również w kontekście wymagań stawionych tym urządzeniom przez samoloty F-35.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, eksploatacja, transport lotniczy, lotniskowe urządzenia hamujące.

1. WPROWADZENIE

Urządzenia awaryjnego hamowania samolotów przeznaczone są do zatrzymania wojskowego samolotu kołującego poza granice drogi startowej podczas przerwającego rozbiegu (startu) lub wydłużonego dobiegu (lądowania).

* Infrastruktura, Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych.

** Logistyka, Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych.

*** Zakład Lotniskowy, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych.

W układach hamujących tych urządzeń energia kinetyczna kołującego samolotu jest zamieniana na inny rodzaj energii, przeważnie energię cieplną. Mechaniczne połączenia statku powietrznego z urządzeniem (jego hamulcami) następuje poprzez elementy wychwytyjące (linę wychwytyjącą lub sieć) i łączące (liny, taśmy) [1].

Urządzenia te są montowane (lokalizowane) w poprzek drogi startowej (DS) pomiędzy jej progami lub na czołowych pasach bezpieczeństwa-CzPB (ang. Runway End Safety Area - RESA) – tylko urządzenia sieciowe [8].

Eksploatację urządzeń awaryjnego hamowania samolotów w lotnictwie Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej (SZ RP) rozpoczęto w latach 80-tych minionego wieku. Wprowadzono wtedy na wyposażenie pułków lotniczych urządzenia sieciowe typu ATU-2M, produkcji byłego Związku Socjalistycznych Republik Radzieckich (ZSRR). Gwarantowały one skuteczne, awaryjne wyhamowanie wszystkich typów samolotów eksploatowanych przez jednostki lotnicze Wojska Polskiego (WP) w tym najnowszych w tamtym okresie, myśliwsko-bombowych Su-22, a także przyjętych na uzbrojenie w roku 1989 myśliwskich MiG-29 [1].

W latach 2005-2006 rozpoczęto eksploatację urządzeń linowych systemu BAK-12, (ang. Barrier Arresting Kit -12) produkcji Stanów Zjednoczonych Ameryki (USA), które zostały zainstalowane na wybranych lotniskach w związku z zakupem przez Polskę samolotów wielozadaniowych F-16. Ponadto, w roku 2007 pozyskano również dwa urządzenia tego samego systemu w wersji mobilnej BAK-12/P-IV (ang. Barrier Arresting Kit -12/Portarrest-IV).

W artykule zostaną omówione doświadczenia z eksploatacji przez Siły Zbrojne RP urządzeń systemu BAK-12, a także wskazane aspekty ich wykorzystania na potrzeby zabezpieczenia eksploatacji, pozyskiwanego samolotu F-35.

2. URZĄDZENIA LINOWE EKSPLOATOWANE W SIŁACH ZBROJNYCH RP

2.1. Stacjonarne urządzenia linowe systemu BAK-12

Urządzenia linowe są urządzeniami dwukierunkowymi, lokalizowanymi pomiędzy progami drogi startowej [8]. Połączenie liny wychwytyjącej z układem hamulcowym urządzenia następuje z wykorzystaniem taśm z tworzywa syntetycznego (przeważnie nylonu). Urządzenia te jednak wymagają od samolotu posiadania elementu, który pozwoli na mechaniczne połączenie liny wychwytyjącej z samolotem i umożliwi jego przechwyt. Elementem takim jest hak wychwytyjący sterowany przez załogę samolotu (rys. 1).



Rys. 1. Hak wychwytyjący samolotu w momencie zaczepienia o linę [Defence24]

Urządzenia linowe odznaczają się wieloma zaletami ważnymi z punktu widzenia użytkownika. Do najważniejszych zalet tych urządzeń, należy zaliczyć [1]:

- możliwość wychwycenia samolotów z napędem odrzutowym, jak i śmigłowym;
- przechwycenie bez udziału personelu lub systemów inicjujących;
- krótki okres uwalniania samolotu i odtworzenia gotowości eksploatacyjnej urządzenia – kilkanaście minut, a tym samym lotniska;
- w zdecydowanej większości przechwyceń lina i taśmy łączące nie wymagają wymiany;
- brak uszkodzeń płatowca spowodowanych przechwyceniem;
- konieczność doboru (konfiguracji) urządzenia tylko pod kątem prędkości i ciężaru wychwytywanego samolotu;
- możliwość przeprowadzania okresowych kontroli urządzeń poprzez wychwycenie samolotu;
- stosunkowo prosta konstrukcja;
- możliwość rozmieszczenia pomiędzy progami drogi startowej;
- możliwe działanie dwukierunkowe.

Urządzenie te mają również wady. Za najważniejsze należy uznać [1]:

- możliwość awaryjnego wyhamowania tylko samolotów wyposażonych w system wychwytywania (hak wychwytyjący);
- stosunkowo krótki okres eksploatacji lin i taśm wychwytyjących (3–4 lata);
- konieczność demontażu lin wychwytyjących:
 - a) podczas przygotowania lotniska do lotów (głównie podczas odśnieżania);
 - b) na progu DS od kierunku podejścia.

Właściwości eksploatacyjne urządzeń linowych zdecydowanie podnoszą układy chowania liny wychwytyjącej w nawierzchnię DS (rys. 2), w które to mogą być one opcjonalnie wyposażane. Układy te są podsystemami urządzeń hamujących [3,14]. Do podstawowych wymogów, jakie muszą spełniać należy zaliczyć:

- niezakłócone uniesienia liny w każdym warunkach pogodowych;

- utrzymanie liny po uniesieniu, na całej operacyjnej szerokości DS, w pozycji umożliwiającej wychwycenie samolotu;
- wychwycenie samolotu przy uderzeniu haka w jeden ze wsporników utrzymujących linę;
- bezpieczne przełożowanie samolotu przez wspornik utrzymujący linę.



Rys. 2. Urządzenie systemu BAK-12 z chowaną liną wychwytyjącą

Ich prawidłowe działanie jest w bardzo dużym stopniu zależne od staranności wykonania prac budowlanych podczas ich montażu. Bezwzględnie muszą tu być przestrzegane zalecenia producenta urządzeń.

W urządzeniach linowych bardzo ważnym podzespołem są elementy prowadzące taśmę łączącą montowane przy krawędzi DS. Są to zespoły rolek prowadzących, których zadaniem jest zapewnienie właściwego przesuwania się taśmy łączącej, utrzymanie jej ponad powierzchnią DS, przenoszenia obciążeń podczas wychwycenia, ograniczenie strefy na DS w obszarze, w którym przesuwa się taśma – strefa ta musi być wolna od wszelkich przeszkód. Rolki umożliwiają również odsunięcie stanowisk hamujących (absorberów energii) urządzeń mobilnych od DS. Mają one różną konstrukcję i występują w urządzeniach stacjonarnych oraz opcjonalnie mobilnych, zwiększając dopuszczalną odległość posadowienia urządzeń od krawędzi DS [5].

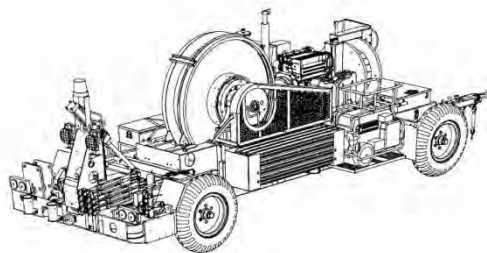
Kolejnym charakterystycznym elementem urządzeń linowych są taśmy łączące. Zapewniają one mechaniczne połączenie liny wychwytyjącej z układem hamulcowym urządzenia. Podczas wychwycenia taśma odwija się z bębna i uruchamia hamulce urządzenia. Dzięki swojej elastyczności ogranicza również przenoszenie sił na płatowiec samolotu. Taśmy wykonywane są z tworzywa sztucznego, zazwyczaj nylonu. Są jednym z najbardziej wrażliwych elementów urządzeń, dlatego też ich eksploatacją jest objęta szczególnym nadzorem. Eksploatowane są w systemie planowo-zapobiegawczym, a ich docelowa norma eksploatacji jest określana w latach oraz przechwyceniach obliczeniowych, określanych w zależności od prędkości samolotu oraz jego ciężaru w momencie przechwycenia [6,13].

Również lina wychwytyjąca zapewniająca połączenie urządzenia z samolotem po przechwyceniu jest eksploatowana wg systemu planowo-zapobiegawczego, a normy eksploatacji są określane w latach. Po wychwyceniu lina podlega wzrokowej kontroli mającej na celu ocenę jej stanu i dopuszczenie do dalszej eksploatacji [12].

Ze względu na rozmieszczanie urządzeń pomiędzy progami DS podczas ich lokalizacji, należy brać pod uwagę kilka elementów. Jednym z kluczowych jest zapewnienie wybiegu o wymaganej długości dla współczesnych samolotów lotnictwa taktycznego, który wynosi ok. 300–370 m [7,8]. Ponadto, nawierzchnia w sąsiedztwie liny wychwytyjącej musi być w odpowiednim stanie technicznym [15, 16] i spełniać podwyższone wymagania w zakresie parametru równości. Jest to spowodowane możliwością podbicia haka na nierówności i niewychwyceniem liny [6, 8].

2.2. Mobilne urządzenia linowe systemu BAK-12

W przypadku urządzeń mobilnych hamulce wraz z niezbędnym osprzętem i wyposażeniem, m.in. elementami kotwiącymi, liną wychwytyjącą, taśmą łączącą oraz narzędziami niezbędnymi do zakotwienia przyczepy są zabudowane na przyczepach (rys. 3). Przyczepa dla urządzenia stanowi platformę transportową oraz umożliwia skuteczne zakotwienie urządzenia do podłoża.



Rys. 3. Urządzenie mobilne systemu BAK-12 w pozycji transportowej [14]

Urządzenia mobilne są wykorzystywane głównie do zabezpieczenia operacji lotniczych w następujących okolicznościach i warunkach [4]:

- DS zniszczona w wyniku celowych działań przeciwnika;
- brak urządzeń awaryjnego hamowania na przejętym lotnisku;
- podczas niesprawności urządzeń stacjonarnych lub podczas ich napraw planowych;
- wykonywanie operacji lotniczych z lotnisk polowych lub drogowych odcinków lotniskowych (DOL).

3. EKSPLOATACJA URZĄDZEŃ LINOWYCH W SZ RP

3.1. System naprawczo-remontowy

Urządzenia linowe w liczbie 10 egz. zostały wprowadzone do eksploatacji w SZ RP w latach 2004–2006, celem zabezpieczenia operacji lotniczych pozyskiwanych do lotnictwa polskiego samolotów wielozadaniowych F-16. Urządzenia dostarczono w ramach programu NATO Security Investment Program (NSIP). Zostały one zainstalowane na obu kierunkach startów i lądowań pięciu wybranych lotnisk: w 12 Bazie Bezpilotowych Statków Powietrznych Mirosławiec (12 BBSP), 21 Bazie Lotnictwa Taktycznego Świdwin (21 BLT), 22 Bazie Lotnictwa Taktycznego Malbork (22 BLT), 31 Bazie Lotnictwa Taktycznego Poznań-Krzesiny (31 BLT), 32 Bazie Lotnictwa Taktycznego Łask (32 BLT) [1].

Specyfikacja pozyskanych dla Sił Powietrznych urządzeń spełnia wymagania dla podstawowego systemu linowego US Air Force (USAF), tj. systemu BAK-12. Urządzenia firmy ESCO zostały wyposażone w dwa układy sterowania: elektroniczny Serwo – zasadniczy oraz mechaniczny – rezerwowo. Zasadnicze parametry specyfikacji technicznej systemu BAK-12 przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1

Zasadnicze dane eksploatacyjne specyfikacji technicznej systemów BAK-12 linowych urządzeń awaryjnego hamowania samolotów [13]

L.p.	Parametr	J.m.	Wartość
1.	Ciężar startowy samolotu	funt (kg)	50 000 (22 680)
2.	Zdolność pochłaniania energii	stopa x funt	85x106
3.	Maksymalny wybieg	stopa (m)	1 200 (366)
4.	Wytrzymałość taśmy łączącej	funt (kg)	105 000 (47 627)
5.	Wytrzymałość liny wychwytywającej	funt (kg)	130 000 (58 967)
6.	Maksymalna prędkość wychwycenia	węzeł (km/godz.)	180 (333)
* dane dla urządzenia z bębniem taśmy łączącej o średnicy 66 cali (167,64 cm)			

Celem zapewnienia ich właściwej eksploatacji i utrzymania w sprawności technicznej, urządzenia zostały objęte 5-letnią gwarancją. Eksploatację urządzeń w czasie trwania gwarancji w zakresie obsługi okresowych oraz napraw realizowała polska firma dokonująca instalacji urządzeń na lotniskach. Specjaliści firmy zostali przeszkoleni przez producenta urządzeń i uzyskali wymagane uprawnienia. Po zakończeniu ochrony gwarancyjnej w dalszym ciągu ten sam podmiot gospodarczy (brak innych na rynku posiadających wymagane uprawnienia) zabezpieczał eksploatację urządzeń.

W trakcie funkcjonowania tego systemu ujawniła się podstawowa jego wada: bardzo długie okresy usprawnienia urządzenia, dochodzące nawet do kilku miesięcy. Powyższy stan rzeczy wynikał z czasu dostępności specjalistycznych tśm (trwałych środków materiałowych), które w całości były importowane z USA. Podmiot obsługujący urządzenia odmawiał stworzenia magazynu z niezbędnymi tśm, które mogłyby być dostępne od ręki w przypadku awarii, a nie zamawiane u producenta urządzeń po zgłoszeniu niesprawności, który również często musiał je zamawiać u swoich poddostawców. Stan ten był szczególnie dotkliwy w okresie gwarancji, kiedy wszystkie tśm musiały być pozyskiwane właśnie u producenta urządzeń. Szczególnie awaryjny okazał się system Servo firmy Moog Inc. Układ ten zapewnia optymalizację siły hamującej w funkcji ciężaru samolotu i jego prędkości w momencie przechwycenia, a także korektę kierunku kołowania przy przechwyceniu nieosiowym. Jego awaria nie powodowała wprawdzie wyłączenia urządzenia z eksploatacji – urządzenie pracowało w systemie mechanicznym, jednakże zmniejszała ochronę statku powietrznego i załogi podczas wychwycenia.

Brak jakichkolwiek działań ze strony podmiotu zabezpieczającego eksploatację urządzeń zmierzających w kierunku usprawnienia systemu usuwania awarii spowodował, że w 2014 r. Infrastruktura IWsp SZ, jako COL (Centralny Organ Logistyczny), podjęła decyzję o utworzeniu w jednostkach podległych Szefowi IWsp SZ komórki remontowej, która byłaby zdolna do zabezpieczenia eksploatacji stacjonarnych i mobilnych urządzeń systemu BAK-12. Komórkę remontową o takich zdolnościach postanowiono utworzyć w Warsztatach Techniki Lotniczej w Toruniu (WTL) w strukturach, w których znajdował się Warsztat Naprawy Urządzeń Infrastruktury Lotniskowej. Z producentem urządzeń (poprzez przedstawiciela w Polsce) ustalono zakres szkolenia. Trzy teoretyczno-praktyczne szkolenia zostały przeprowadzone w zakładzie producenta urządzeń w latach 2012-2016.

Przeszkoleni specjaliści WTL uzyskali końcowe uprawnienia do:

- wykonywania obsługiwań okresowych;
- diagnozowania niesprawności i wykonywania napraw doraźnych;
- przeprowadzania napraw głównych w tym planowych wynikających z dokumentacji technicznej urządzeń;
- szkolenia bezpośredniej (etatowej) obsady urządzeń oraz personelu logistycznego jednostek wojskowych.

W Warsztatach Techniki Lotniczej w Toruniu stworzono warsztat i wyposażono go w specjalistyczne narzędzia i przyrządy niezbędne do wykonywania prac naprawczych (rys. 4) oraz samochód warsztatowy, zabezpieczający wykonywania napraw u użytkownika.



Rys. 4. Hala warsztatowa urządzeń awaryjnego hamowania samolotów w WTL Toruń

Zorganizowano również, w Składzie Toruń, magazyn tśm do urządzeń i przeniesiono do niego części zamienne (z wyjątkiem lin wychwytyjących i taśm łączących) magazynowane do tej pory w Wielkopowierzchniowym Wielobranżowym Składzie Materiałowym Kutno.

3.2. Urządzenia BAK-12 a zabezpieczenie eksploatacji nowego samolotu wielozadaniowego

Planowane do wprowadzenia na wyposażenie SZ RP samoloty wielozadaniowe nowego typu F-35 charakteryzują się w stosunku do eksplotowanych aktualnie F-16, większym ciężarem startowym. Maksymalny ciężar startowy samolotów F-16 eksplotowanych przez polskie lotnictwo wynosi 48 000 funtów (21 772 kg) natomiast ogólnie dostępne źródła dla samolotów F-35 podają wartość 70 000 funtów (31 751 kg), jest to więc poważny przyrost tej wartości, a ciężar startowy samolotu F-35 jest porównywalny z ciężarem samolotu F-15. Nasuwa się więc pytanie czy eksplotowane aktualnie urządzenia awaryjnego hamowania będą w stanie zabezpieczyć samoloty F-35. Należy również brać pod uwagę zabezpieczenie sojusznicznych samolotów, w tym obu wymienionych typów, operujących z naszych lotnisk z coraz większą częstotliwością.

Pomocne w wyciągnięciu wniosków mogą być dane z wychwyceń samolotów F-15 jakie miały miejsce na jednym z lotnisk Sił Powietrznych. Parametry wychwycenia zestawiono w tab. 2, wraz z parametrami wychwycenia samolotów F-16, również jakie miały miejsce na tym lotnisku.

Tabela 2

Parametry wychwycenia samolotów F-15 i F-16 na polskim lotnisku

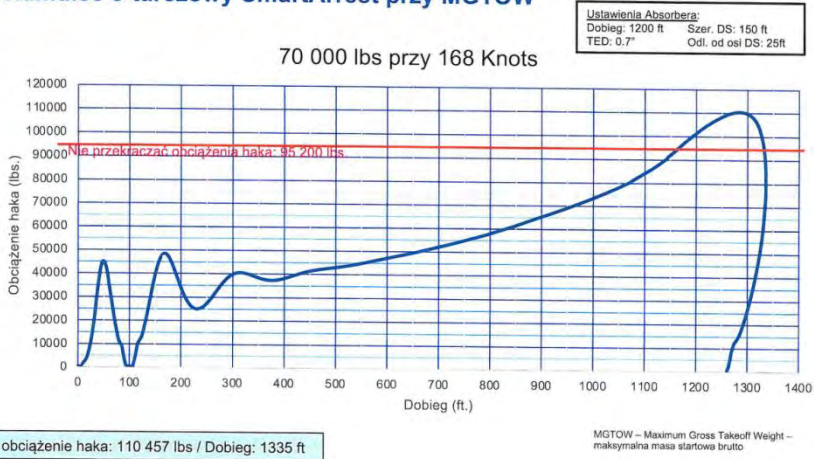
L.p.	Data	Typ samolotu	CieŜar [funt]	Prędkość [węzeł]	Wybieg [stopa]
1	11.07.2012	F-16	21.384	70	brak danych
2	12.12.2014	F-16	33.951	119	brak danych
3	03.06.2016	F-16	28.000	80	697
4	30.11.2016	F-16	29.760	72	627
5	02.11.2020	F-16	30.203	30	213
6	19.04.2021	F-15	45.000	131	1200
7	10.03.2022	F-15	45.000	135	1037
8	05.04.2022	F-15	50.000	141	1195

Jak łatwo zauważyć, zatrzymanie samolotów F-15 nastąpiło na drodze zbliżonej lub równej maksymalnemu wybiegowi dla urządzeń BAK-12, który wynosi 1200 stóp (tab. 1). Należy zwrócić uwagę, że prędkości przechwycen F-15 były stosunkowo duże, lecz mniejsze od prędkości maksymalnych określonych dla tych urządzeń, tj. 180 węzłów. Wstępnie można wnioskować, że urządzenia pracowały już w pobliżu granicy swojej wydajności, a układy elektroniczne wydłużały maksymalnie wybieg, aby nie przekroczyć dopuszczalnych obciążeń płatowca samolotu (siły na haku).

Powyższy stan rzeczy potwierdzają również symulacje przeprowadzane w tym zakresie przez producenta urządzeń. Na wykresach (rys. 5 oraz rys. 6) przedstawiono symulacje przeprowadzone dla wychwycen samolotu F-35 przez urządzenie wyposażone w 8-tarczowe hamulce – analogiczne do hamulców jakie posiadają polskie urządzenia oraz 12-tarczowe, przy następujących warunkach brzegowych:

- ciężar samolotu podczas przechwycenia – 70.000 funtów;
- prędkość przechwycenia – 168 węzłów;
- dopuszczalna siła na haku, podczas wychwycenia – 95.200 funtów;
- praca urządzeń w trybie elektronicznym (układ SmartArrest).

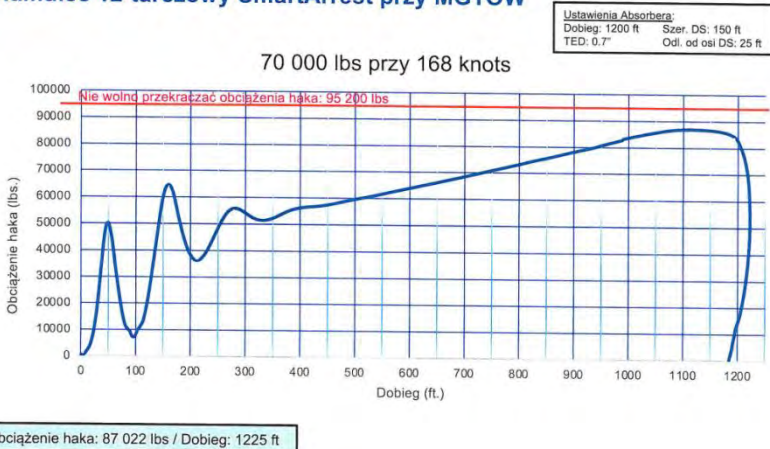
F-35, Hamulec 8-tarczowy SmartArrest przy MGTOW



Rys. 5. Przebieg wychwycenia samolotu F-35 przez urządzenie z układem hamulcowym 8-tarczowym

W przypadku hamulców 8-tarczowych jak łatwo zauważyć nastąpiło przekroczenie dopuszczalnej siły, jaka może być wygenerowana na haku samolotu F-35 bez uszczerbku dla płatowca oraz długości wybiegu, który osiągnął wartość 1335 stóp. Stan taki sugeruje, że urządzenie może zapewnić ochronę załogi samolotu. Przyłożenie na haku siły o wartości przekraczającej dopuszczalną, może spowodować natomiast uszkodzenie płatowca samolotu.

F-35, Hamulec 12-tarczowy SmartArrest przy MGTOW



Rys. 6. Przebieg wychwycenia samolotu F-35 przez urządzenie z układem hamulcowym 12-tarczowym

Symulacja przeprowadzona dla hamulców 12-tarczowych wskazuje, że bezpieczne zatrzymanie samolotu nastąpi bez przekraczania dopuszczalnego obciążenia haka przy praktycznie nominalnym wybiegu. Chroniona więc będzie tak załoga samolotu, jak i sam samolot.

WNIOSKI

Przeprowadzone obserwacje parametrów przechwyceń sojusznicznych samolotów F-15 na polskim lotnisku oraz symulacje przechwyty dla urządzeń w układzie hamulcowym 8-tarczowym i 12-tarczowym pozwalają wstępnie wnioskować, że pełna ochrona załogi oraz samolotu będzie możliwa po modernizacji eksploatowanych urządzeń. Wymagane jednak w tym względzie będą szersze konsultacje z producentem urządzeń, gdzie podstawą do podjęcia decyzji byłyby rzeczywiste (próbne) przechwylenia symulujące przechwyt samolotu F-35.

Ewentualna modernizacja eksploatowanych urządzeń byłaby możliwa podczas wykonywania ich planowych napraw głównych. Uzasadnione byłoby również w przypadku potwierdzenia jej konieczności, wykonanie rozbudowy hamulców przed przyjęciem samolotów F-35 przez SZ RP, przynajmniej na lotniskach planowanego ich bazowania.

Mając na uwadze aktualny potencjał remontowo-warsztatowy WTL Toruń, taka modernizacja mogłaby być przeprowadzona siłami tego warsztatu, oczywiście po odpowiednim przeszkoleniu przez specjalistów producenta urządzeń.

LITERATURA

1. Adamowicz M, Poświata A, Wesołowski M. Eksploatacja urządzeń awaryjnego hamowania samolotów w lotnictwie Sił Zbrojnych RP. Część 1. Journal of KONBiN 2021, Volume 51, Issue 1, DOI 10.2478/jok-2021-0008, str. 105-124, Warszawa 2021.
2. Bulletin 001. Safety First. Technical Series II. Aircraft Arresting System. Basics. Engineered Arresting Systems Corporation, 2004.
3. Bulletin 002. Safety First. Technical Series II. Retractable Hook Table Systems. Engineered Arresting Systems Corporation, 2003.
4. Bulletin 004. Safety First. Technical Series II. Mobile Aircraft Arresting Systems. Engineered Arresting Systems Corporation, 2003.
5. Bulletin 005. Safety First. Technical Series II. Runway Edge Sheaves. Engineered Arresting Systems Corporation, 2003.

6. Bulletin 006. Safety First. Technical Series II. Purchase Tape. Engineered Arresting Systems Corporation, 2003.
7. Bulletin 007. Safety First. Technical Series II. Arresting System Installation. Engineered Arresting Systems Corporation, 2003.
8. Facilities Criteria (FC). Air Force Aircraft Arresting Systems (AAS) installation, operation, and maintenance (IO&M). FC 3-260-18F.
9. Operation and Maintenance Instructions, Arresting Systems, Aircraft, Mobile. T.O. 35E8-2-10-1.
10. Operation, Maintenance, and Installation Instructions with Illustrated Parts Breakdown, Hook Cable Support System, Model BAK-14. FC 3-260-18F. T.O. 35E8-2-8-1.
11. Operations Manual for the BAK-14 Hook Cable Support Systems (Pit Mounted with Heaters) 14 and 20 Box Systems. T.O. 35E8-2-8-1-11.
12. Podręcznik obsługi absorbera energii BAK-12 ze sterowaniem Smart-Arrest. Opis techniczny, eksploatacja i ilustrowany katalog części zamiennych. OM-EA-320. Engineered Arresting Systems Corporation.
13. Podręcznik obsługi. System zatrzymania samolotów z serwami i liną hakową. Polska, SOM-056. Engineered Arresting Systems Corporation, 2004.
14. Przewoźne urządzenie awaryjnego hamowania samolotów BAK-12/P-IV. Opis techniczny i eksploatacja. SOM-088. Engineered Arresting Systems Corporation.
15. Wesołowski M., Iwanowski P.: APCI Evaluation Method for Cement Concrete Airport Pavements in the Scope of Air Operation Safety and Air Transport Participants Life, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(5), 1663, 2020.
16. Wesołowski M., Iwanowski P.: Evaluation of Asphalt Concrete Airport Pavement Conditions Based on the Airfield Pavement Condition Index (APCI) in Scope of Flight Safety, *Aerospace*, 7(6), 78, 2020.

OPERATIONS & MAINTENANCE OF THE AIRCRAFT ARRESTING GEAR CABLES IN THE POLISH AIR FORCE

Abstract

The issue of safety is inextricably linked with aviation and is one of the most important aspects of its functioning. The process of securing air operations involves many elements that can be grouped into three groups: man, plane and the environment. Each of them plays a different but significant role in this process. One of the elements of this process are aircraft emergency braking devices, which, in the event of a non-standard take-off or landing course, allow for a safe stopping of the taxiing aircraft, thus protecting the health of its crew and high-value property. For this reason, their technical efficiency is a key element determining the level of safety provided by these devices.

In the article, the authors presented and discussed in detail the rope emergency braking devices used in the aviation of the Polish Armed Forces, as well as the conclusions resulting from the process of their long-term operation, also in the context of the requirements imposed on these devices by the F-35 aircraft.

Keywords: safety, operation, air transport, airport braking devices.

Natalia WIŚNIEWSKA*
Tomasz KRAKOWSKI**

WSTĘPNA ANALIZA AKTYWNEGO AERODYNAMICZNEGO STEROWANIA PRĘDKOŚCI ROTACJI DLA RAKIET PODDŹWIĘ- KOWYCH

Artykuł prezentuje budowę modelu rotacji występującej podczas misji rakiety sondażowej oraz projekt układu sterowania z wykorzystaniem układu powierzchni sterowych zlokalizowanych przed środkiem parcia obiektu (układ kaczki). Analiza związana jest z wykonaniem serii symulacji bazujących na pełnym modelu dynamiki (6 stopniach swobody), z wykorzystaniem uproszczonej charakterystyki aerodynamicznej. Na podstawie przeprowadzonych badań wybrano regulator ADRC wykorzystany w sterowniku rotacji rakiet sondażowych.

Słowa kluczowe: rakiet sondażowa, kontrola rotacji, ADRC

1. WSTĘP I MOTYWACJA

Analiza danych telemetrycznych z testów rakiet ćwiczebnych ARAV-B opracowanych na potrzeby programu AEGIS [Smith i Cullina 2011] wykazała, iż celowe wprowadzenie kąta nachylenia stateczników głównych o $0,5^\circ$ prowadzi do uzyskania prędkości obrotowych na poziomie $540^\circ/\text{s}$ wzdłuż osi głównej rakiety. Jest to działanie poprawiające pasywną stabilizację toru lotu, jednak zwiększające wymagania odnośnie stabilizacji awioniki, a także mogące wprowadzić dodatkowe obciążenia systemu odzysku i pozycjonowania ładunku. Problem pasywnej eliminacji zjawiska został opisany w raporcie podsumowującym projekt rakiet Aerobee 350 [Lane i Chalfant 1967]. W przypadku typowego profilu misji współczesnej rakiety sondażowej, której celem jest zebranie danych z kamer pokładowych oraz czujników inercyjnych,

* Koło naukowe PUT Rocketlab, Instytut Energetyki Ciepłej, Politechnika Poznańska.

** Instytut Mechaniki Stosowanej, Politechnika Poznańska.

niekontrolowany obrót w osi głównej rakiety jest zjawiskiem szczególnie niepożądanym wpływającym negatywnie na jakość zebranych danych przez urządzenia badawcze.

Powodem występowania rotacji są kątowe niedokładności montażowe głównych stateczników, korpusu oraz silnika [Nielsen 1961]. Możliwe jest wprowadzenie wysokich wymagań odnośnie do dokładności montażu kąтового komponentów rakiety. Jednak rozwiązanie to prowadzi do znaczącego zwiększenia kosztu całego systemu, ze względu na konieczność wykonania złożonych pomiarów prostopadłości stateczników względem korpusu z wykorzystaniem współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Dlatego atrakcyjną alternatywą jest opracowanie systemu aktywnie tłumiącego rotację.

W celu zbadania wpływu podanych czynników, poddano analizie przyczyny powstawania tego zjawiska. Skupiono się na rozważaniach analitycznych oraz weryfikowano wiedzę symulacyjnie. Na podstawie przeprowadzonej analizy dobrano rodzaj regulatora zaimplementowanego w rakiecie testującej koncepcję układu aerodynamicznej kontroli rotacji. Jako układ testowy wybrano konfigurację kaczki, w której rozkład aerodynamiczny stateczników jest rozszerzony o układ powierzchni sterowych zlokalizowanych przed środkiem parcia. Dobór rozwiązania podyktowany był studium dostępnych rozwiązań, ukierunkowany na uzyskanie wysokiej manewrowości przy niskim koszcie komponentów układu sterowania [Fresconi et al. 2015].

Wprowadzenie zaproponowanego układu kontroli nie tylko umożliwia minimalizację prędkości obrotowej rakiety sondażowej. Dodatkowo stanowi bazę do rozwoju układu kontroli toru lotu rakiety. Możliwości programowania ścieżki lotu badawczego pośrednio zwiększająca bezpieczeństwo misji poprzez zwiększenie powtarzalności systemu odzysku, a także bezpośrednio poprawią powtarzalność warunków pracy urządzeń badawczych umieszczonych w rakiecie badawczej.

2. ANALIZA WPLYWU NIEDOKŁADNOŚCI MONTAŻOWYCH NA KĄT NATARCIA I PRĘDKOŚĆ ROTACJI

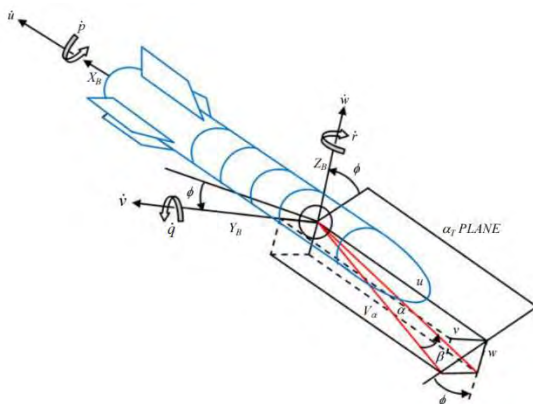
Podczas lotu rakiety występują niezerowe momenty wymuszające na prędkość obrotową w poszczególnych osiach rakiety. Oś podłużna (ang. roll), czyli oś równoległa do korpusu rakiety, w której działa ciąg silnika jest główną osią, dla której badana jest rotacja. Minimalizacja rotacji w osi pionowej (ang. pitch) i poprzeczna (ang. yaw) zapewniana jest przez główne stateczniki. O wartości indukowanej prędkości obrotowej rakiety, decyduje stopień asymetrii rakiety. Przez symetryczność rakiety rozumie się równomierny rozkład masy, zerowy kąt błędu montażu stateczników oraz idealnie wyprofilowany profil głowicy [Fleeman (red.) 2006]. W związku z tym, dalsze rozważania zostaną przeprowadzone na podstawie układu odniesienia typowego dla raket manewrujących (Rys. 1).
gdzie:

$\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ - przyspieszenie kątowe dla roll, pitch i yaw [rad/s^2],

$\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ - przyspieszenie liniowe [m/s^2],

Φ, α, β - wychylenia w osi podłużnej, pionowej, poprzecznej [rad],

$\alpha_T PLANE$ - płaszczyzna globalnego kąta natarcia dla $\alpha_T = \tan^{-1} \left[\sqrt{(v^2 + w^2)/u} \right]$ [rad].



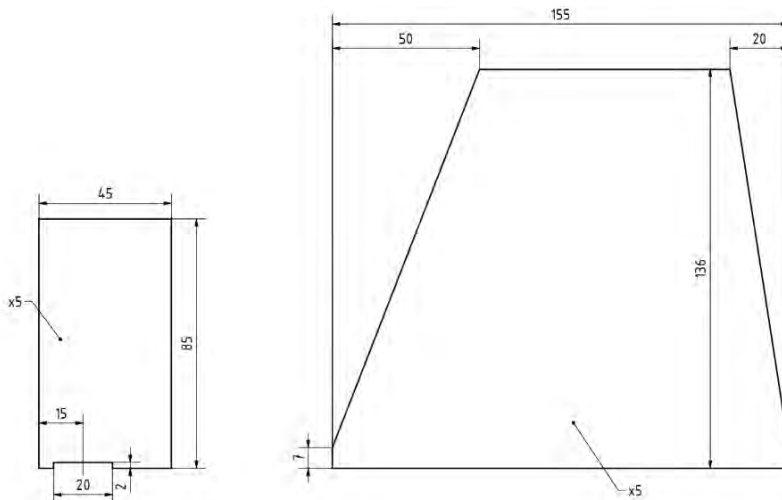
Rys. 1. Układy odniesienia w modelu dynamicznym rakiety sondażowej [Aliyu Bhar Kisabo et al. 2019]

Do określenia przebiegów prędkości rotacji i kąta natarcia dla wybranych przypadków wykorzystano symulator OpenRocket [Niskanen 2009]. Jest to narzędzie bazujące na zmodyfikowanej metodzie Barrowmana pozwalającej na analityczne wyznaczanie charakterystyki aerodynamicznej. Modyfikacje polegają na poprawie odwzorowania reżimu transonicznego [Niskanen 2009], dodanie powierzchni sterowych oraz stateczników o przekroju profilu lotniczego [Hall 1989], a także rozszerzenie modelu o loty z wyższymi kątami natarcia (do 45°) [LaBudde 1999]. W kolejnych krokach symulacji podawany jest wektor zmiennych wartości atmosferycznych, a także aktualizowane są właściwości dynamiczne modelu rakiety (uwzględnienie zmiany momentu bezwładności i środka masy przy wypaleniu paliwa) w celu wiernego wyznaczenia przyspieszeń kątowych i liniowych. Pętla iteracyjna kroku symulacji zakończona jest podwójnym całkowaniem (metoda Rungego-Kutty czwartego rzędu rozszerzona o poprawę stabilności obliczeń numerycznych [Dormand i Price 1980]) do wyznaczenia trajektorii rakiety. Analityczne wyznaczenie lokalizacji środka parcia pozwala na odwzorowanie wpływu wprowadzanych wymuszeń powierzchni sterowych na lot rakiety. Co pozwala na sprawdzenie serii konfiguracji i dobór wymaganej wielkości powierzchni sterowych do stateczników. Dokładna analiza docelowej konfiguracji musi być przeprowadzona z wykorzystaniem numerycznej mechaniki płynów lub badań w tunelu, w celu przetestowania interakcji aerodynamicznej układu sterowego i głównych stabilizatorów.

Badania przeprowadzono dla autorskiego modelu rakiety Jade Arrow (Rys. 2). Jest to konstrukcja przystosowana do taniego i powtarzalnego wykonywania lotów testowych. Bazująca na materiałach z kompozytów na bazie żywicy epoksydowej i włókna szklanego oraz komponentów z PETG drukowanych 3D metodą przyrostową FDM (ang. fused deposition modeling - osadzanie topionego materiału). Budowa układu sterowania pozwala na szybką wymianę badanej powierzchni sterowej (bazowa konfiguracja przedstawiona na Rys. 3).



Rys. 2. Wizualizacja rakiety testowej wykorzystanej w symulacji



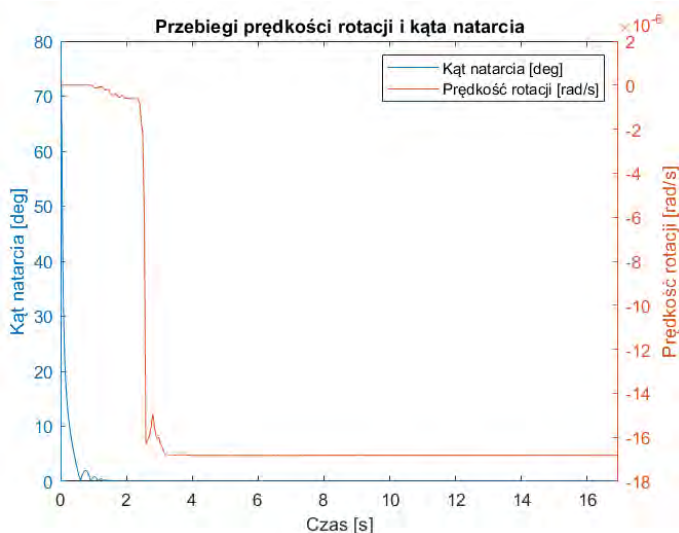
Rys. 3. Geometria stateczników oraz powierzchni sterowych rakiety testowej aerodynamicznych układów kontroli rotacji

Napędem wykorzystanym do badań jest klaster 2 silników klasy H (Pains Ikaros) o łącznym impulsie około 420 Ns. Modułowość konstrukcji pozwala na wykorzystanie silnika klasy K (impuls całkowity od 1280 do 2560 Ns) i przeprowadzenie badań w zakresie wyższych przyspieszeń (do 14G) w zakresie transonicznym (do $Ma=0.9$). Rozkład masy i wielkość stateczników zapewnia pasywną stabilizację toru lotu rakiety w każdej z podanych konfiguracji silnikowych.

Do badań układu sterowania wykorzystano wyłącznie fazy lotu poprzedzające wyrzucenie spadochronu w apogeum.

2.1. Kąt natarcia oraz prędkość rotacji w przypadku symetryczności rakiety

W przypadku gdy rakieta jest symetryczna, zaburzenia fizyczne spowodowane naturą zjawiska są szybko korygowane. Dla zerowego wychylenia wyrzutni oraz braku wiatru, rakieta zachowuje pionową trajektorię i nie występują przyspieszenia kątowe wywołujące rotację. Podczas gdy występuje kąt wychylenia wyrzutni, powstaje kąt natarcia, który jest jednak mało znaczący. Czynnikiem powodującym znaczne kąty natarcia okazuje się być wiatr. Wykresy kąta natarcia oraz prędkości rotacji przedstawiono na Rys. 3 oraz Rys. 4.

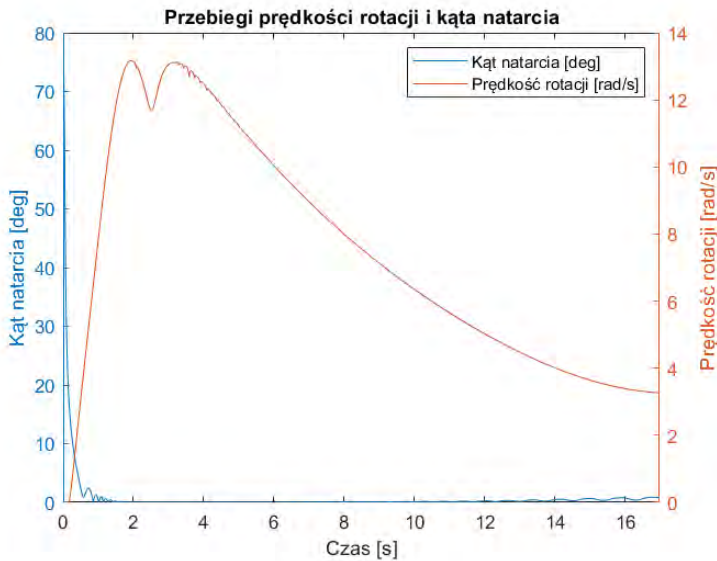


Rys. 4. Przebiegi prędkości rotacji i globalnego kąta natarcia rakiety dla wychylenia wyrzutni 15° , prędkości wiatru 5 m/s i kierunku wiatru określonego względem wyrzutni równego 90°

Symetria rakiety i brak kąta przekrzywienia stateczników, powodują szybkie tłumienie kąta natarcia oraz nieznaczącą prędkość rotacji wynikającą z błędów numerycznych (Rys. 4).

2.2. Kąt natarcia oraz prędkość rotacji w przypadku asymetrii

Asymetria rakiety jest naturalnie występującą prawidłowością. Do dalszych rozważań zostanie wykorzystany przypadek asymetryczności ze względu na kąt błędu montażu stateczników. Przebiegi prędkości rotacji oraz kąta natarcia dla wszystkich stateczników ściętych pod kątem 1° przedstawiają się następująco:



Rys. 4. Przebiegi prędkości rotacji i globalnego kąta natarcia rakiety dla wychylenia wyrzutni 15° , prędkości wiatru 5 m/s i kierunku wiatru określonego względem wyrzutni równego 90° i ustawienia stateczników pod kątem 1°

Kąt nachylenia stateczników wynoszący 1° wprowadza znaczną prędkość rotacji na poziomie 12 rad/s. Symulacja z tak podstawowymi założeniami pokazuje stopień skomplikowania zaburzeń. Dla układu sterowania na obiekt działa zmienne zaburzenie o dużej dynamice, zależne od wartości liczby Macha.

3. DOBÓR METODY STEROWANIA

Bazując na dokonanych symulacjach oraz studium literaturowym stwierdzono, że konwencjonalne metody sterowania są niewystarczające, by spełnić założenia projektowe. Do zaprojektowania układu regulacji zdecydowano wykorzystać narzędzia z zagadnienia sterowania adaptacyjnego. Postanowiono porównać metodę szeregowania parametrów oraz ADRC.

3.1 Szeregowanie parametrów (Parameter/Gain Scheduling)

Szeregowanie parametrów jest metodą sterowania zakładającą wyznaczenie nastaw regulatora dla wielu punktów pracy. Przybliża się dynamikę obiektu w konkretnych punktach pracy przez aproksymację liniową, przez co model obiektu może być traktowany jako system liniowy o zmieniających się parametrach. Poprzez wybrane zmienne opisujące układ (tzw. szeregujące) można określić w jakim zakresie pracy znajduje się układ, a następnie załączyć odpowiednie nastawy regulatora liniowego. Model sterowania z szeregowaniem parametrów ma ograniczenia adaptacyjne związane z tym, że zmiany zachodzące w dynamice obiektu oraz charakterze zakłóceń muszą być przewidywalne i wykrywalne [Zhiqiang Gao 2002]. Kolejną cechą następującego sterowania jest fakt, iż adaptacja realizowana jest w układzie otwartym. Taki stan rzeczy powoduje to, że nie ma sprzężenia zwrotnego pomiędzy aktualną jakością sterowania, a wyborem parametrów sterowania. Warto mieć na uwadze również, że bardzo częste zmiany parametrów sterownika (w szerokim zakresie) mogą doprowadzić do utraty stabilności układu. Określenie zestawów parametrów sterownika może być bardzo czasochłonne i kosztowne, szczególnie w zastosowaniu do układu kontroli ukierunkowanej na rakiety badawcze. Wybrany sterownik wymaga również dokładnej weryfikacji symulacyjnej.

3.2. ADRC (Active/Adaptive Disturbance Rejection Control)

ADRC jest metodą, którą można traktować jako technikę odporną. Algorytm ten zapewnia wysoką niezawodność na niepewność struktury modelu oraz zakłócenia zewnętrzne bez przestrajania sterownika [Zhiqiang Gao 2006]. W tej metodzie zakłada się przybliżoną znajomość rzędu dynamiki obiektu sterowania oraz zgrubną wartość skalującą w torze sygnału sterowania. Co ważne sterownik realizuje adaptacje w torze zamkniętym. Zapewnia on również adaptację do zmian dynamiki obiektu i charakteru zakłóceń w szerokim zakresie. Pętla wewnętrzna sterownika związana jest z przybliżaniem całkowitego zaburzenia (niepewności modelu obiektu, zakłócenia zewnętrzne), natomiast pętla zewnętrzna wiąże się z sterownikiem konwencjonalnym. O jakości sterowania stanowi estymacja całkowitego zaburzenia, co bezpośrednio wiąże się z odpowiednio małym okresem próbkowania.

3.3 Wybór metody sterowania

Podejście szeregowania parametrów wymaga zastosowania od kilkunastu do kilkudziesięciu parametrów projektowych. Ta metoda potrzebuje również przewidywalności zmian dynamiki procesu. Wiedząc, że bezpośrednią przyczyną występowania

prędkości rotacji są nieznane kąty uchylenia stateczników oraz że dynamika procesu jest mało przewidywalna (warunki atmosferyczne, różnice konstrukcyjne), takie podejście mogłoby nie dać zadowalających efektów. Inną kwestią jest koszt pracy jaki trzeba ponieść, żeby dobrać zestawy parametrów. Określone nastawy dla jednego modelu mogą okazać się mało elastyczne w kontekście innych modeli rakiet.

Sterownik ADRC wymaga zaledwie kilku parametrów projektowych. Dzięki zastosowaniu estymatora rozszerzonego stanu ESO oraz odpowiedniego sterownika pętli kompensującej, możliwe będzie efektywne tłumienie zaburzenia. Wspomniany sterownik zapewnia również mniejszy koszt sterowania, ponieważ prowadzi on obliczenia w trakcie pracy (online) wykorzystując tylko te zasoby, które są potrzebne do efektywnego tłumienia. Będzie on również bardziej elastyczny w kontekście różnych modeli rakiet. Po rozważeniu wad i zalet obu metod sterowania, zdecydowano się na wykorzystanie sterownika ADRC.

4. IMPLEMENTACJA STEROWNIKA ADRC

4.1 Model zjawiska i implementacja symulatora

Do wyznaczenia modelu procesu wykorzystano poniższe równanie przedstawiające przyspieszenie kątowe w osi podłużnej rakiety [Aliyu Bhar Kisabo et al. 2019] [rad/s²]:

$$\dot{p} = \frac{L_A + L_P - q \cdot r (I_z - I_y)}{I_x} \quad (1)$$

gdzie:

L_A - momenty sił aerodynamicznych [Nm],

L_P - momenty sił napędowych [Nm],

I_x, I_y, I_z - momenty bezwładności rakiety dla poszczególnych osi [kg·m²],

q, r - prędkość kątowna dla osi pionowej i poprzecznej [rad/s].

Momenta wymuszające rotację (aerodynamicznie) wynikające z ustawienia powierzchni sterowych i stateczników można zapisać w następującej formie:

$$\begin{aligned} L_A &= L_{Ac} + L_{As} \\ L_{As} &= 0.5\rho V_M^2 C_{ls} S_s d_s \\ L_{Ac} &= 0.5\rho V_M^2 C_{lc} S_c d_c \\ C_{ls} &= C_{l\delta_r} \delta_r - \frac{d_s}{2V_M} C_{lps} \cdot p \end{aligned} \quad (2)$$

$$C_{lc} = C_{l\delta} \delta - \frac{d_c}{2V_M} C_{lpc} \cdot p$$

gdzie:

C_{l_s} - współczynnik momentu wymuszającego wyznaczany dla stateczników działający osi podłużnej rakiety [-],

C_{l_c} - współczynnik momentu wymuszającego wyznaczany dla powierzchni sterowych działający osi podłużnej rakiety [-],

$C_{l_{ps}}$ - współczynnik momentu tłumiącego wyznaczany dla stateczników działający osi podłużnej rakiety [-],

$C_{l_{pc}}$ - współczynnik momentu tłumiącego wyznaczany dla powierzchni sterowych działający osi podłużnej rakiety [-],

$C_{l_{\delta_r}}$ - pochodna współczynnika C_{l_s} dla kątowej niedokładności montażu statecznika [-],

$C_{l_{\delta}}$ - pochodna współczynnika C_{l_c} dla kąтового wychylenia powierzchni sterowej [-],

p - prędkość kątowa w osi podłużnej rakiety [rad/s],

V_M - prędkość środka ciężkości rakiety [m/s],

S_c - sumaryczna powierzchnia układu sterowania [m²],

S_s - sumaryczna powierzchnia stateczników [m²],

ρ - gęstość powietrza [kg/m³],

d_s - ramię działania wypadkowej siły tłumiącej rotację rakiety – składowa pochodząca od statecznika [m],

d_c - ramię działania wypadkowej siły tłumiącej rotację rakiety – składowa pochodząca od powierzchni sterowej [m],

δ_r - kąt nachylenia stateczników [rad],

δ - kąt wychylenia powierzchni sterowych [rad].

Po podstawieniu i uporządkowaniu:

$$\begin{aligned} \dot{p} I_x - L_p + qr(I_z - I_y) - \frac{\rho V_M^2 S_s d_s C_{l_{\delta_r}}}{2} \cdot \delta_r + \dots \\ + \left(\frac{\rho V_M S_s d_s^2 C_{l_{ps}}}{4} + \frac{\rho V_M S_c d_c^2 C_{l_{pc}}}{4} \right) \cdot p = \frac{\rho V_M^2 S_c d_c C_{l_{\delta}}}{2} \cdot \delta \end{aligned} \quad (3)$$

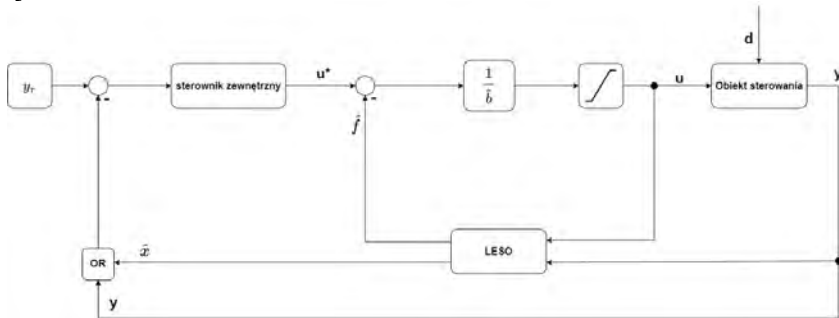
Gdzie: $\mu = 0.5\rho V_M^2 S_c d_c C_{l_{\delta}}$ skaluje wartośćysterowania powierzchni sterowych.

Przy symetrycznej rakiecie wyrażenie $qr(I_z - I_y)$ redukuje się, ponieważ moment bezwładności w tych płaszczyznach jest taki sam. Sumaryczna doświadczalna powierzchnia obu zestawów lotek będzie wyznaczona na podstawie empirycznej zależności liczby stateczników na generowany moment korygujący [Diederich et al

1951]. W ramach symulacji algorytmu równanie modelu zostało zaimplementowane w środowisku Simulink.

4.2 Struktura sterownika

Zaprojektowanie sterownika ADRC wiąże się z wyznaczeniem oraz implementacją obserwatora ESO (Extended-State Observer) w formie obserwatora Luenbergera LESO [Zhiqiang Gao 2006] oraz doбором odpowiedniego sterownika pętli zewnętrznej.



Rys. 6. Struktura układu regulacji

Struktura układu regulacji (Rys.6) dzieli się na pętlę zewnętrzną oraz wewnętrzną. Pętla zewnętrzna zawiera sterownik kompensujący (zewnętrzny). Pętla wewnętrzna składa się z obserwatora LESO, odwrotności zgrubnego współczynnika skalującego tor sterowania (\hat{b}) oraz estymowanego całkowitego zaburzenia (\hat{f}). Dodatkowo uwzględnienia się zaburzenia (d) oraz saturację obiektu. Wartość zadana prędkości rotacji oznaczana jest przez y_r . W ramach projektowania układu sterowania możliwy jest dobór sygnału pomiarowego (y) lub estymaty tego sygnału (\hat{x}). Wybór zależy od tego jak bardzo zakłócone są pomiary.

Do implementacji sterownika pętli zewnętrznej zdecydowano się wykorzystać sterownik proporcjonalny, ponieważ układ jest pierwszego rzędu. W związku z tym, wybrany sterownik jest wystarczający.

Chcąc zaimplementować sterownik na mikrokontrolerze trzeba uzyskać postać dyskretną sterownika [Miklosovic et al. 2006]. Dyskretna postać sterownika ADRC przedstawia się następująco:

$$\begin{aligned}
 x(n) = \begin{pmatrix} p_{est} \\ f_{est} \end{pmatrix} &= A_d x(n-1) + B_d u(n-1) + O_d (p(n-1) \\
 &\quad - p_{est}(n-1)) \\
 A_d &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} T_a
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} \hat{b} \\ 0 \end{bmatrix} T_a$$

$$O_d = T_a \begin{bmatrix} 2\omega_0 \\ \omega_0^2 \end{bmatrix}$$

gdzie:

$p_{est}(n-1)$ - estymowana prędkość rotacji [rad/s],

$p(n-1)$ - wartość pomiaru prędkości rotacji [rad/s],

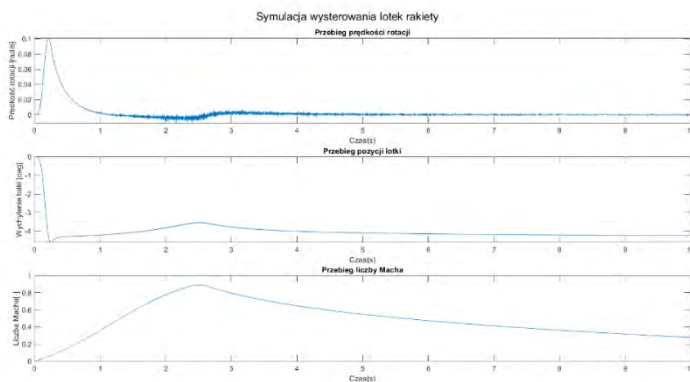
T_a - okres próbkowania sterownika [s],

ω_0 - pulsacja graniczna pasma przenoszenia [rad/s].

Zastosowanie sterownika ADRC wiąże się z określeniem pasma przenoszenia, wzmocnienia k_p sterownika proporcjonalnego oraz dla dyskretnej implementacji odpowiednio gęstego czasu próbkowania. Wartości ω_0 oraz k_p powinny być jak największe, ponieważ chcemy przenieść jak najwięcej informacji z pomiaru oraz jak najszybciej wyzerować prędkość rotacji. W rzeczywistości istnieje górne ograniczenie dla parametrów projektowych ω_0 oraz k_p wynikające z jakości pomiarów.

4.3 Symulacja sterownika

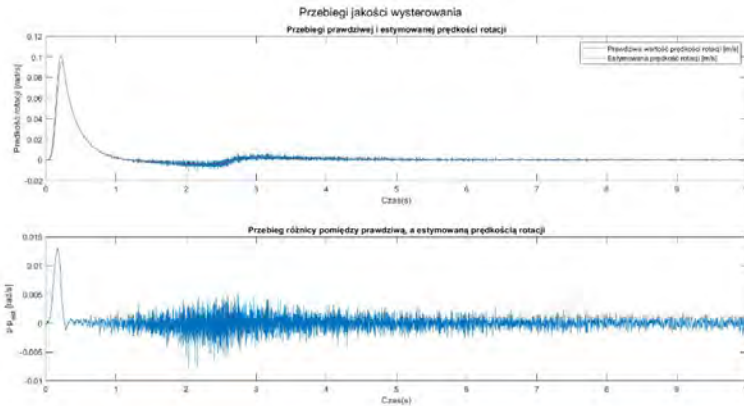
Wykorzystując zaimplementowany symulator, można przetestować wybrany algorytm sterowania. Symulacje przeprowadzono dla powierzchni sterowej o długości 120 mm oraz powierzchni prostokątnej 5400 mm². Powierzchnia jednego statecznika wynosi 18800 mm², natomiast ustawienie kątowe statecznika to 0.1°. Czas próbkowania sterownika wynosi $T_a = 1000$ Hz, pulsacja graniczna $\omega_0 = 50$ rad/s oraz $k_p = 5$. Wyniki symulacji przedstawione są w postaci przebiegów wybranych wartości fizycznych (Rys.7).



Rys. 7. Przebiegi prędkości rotacji, pozycji lotki i liczby Macha

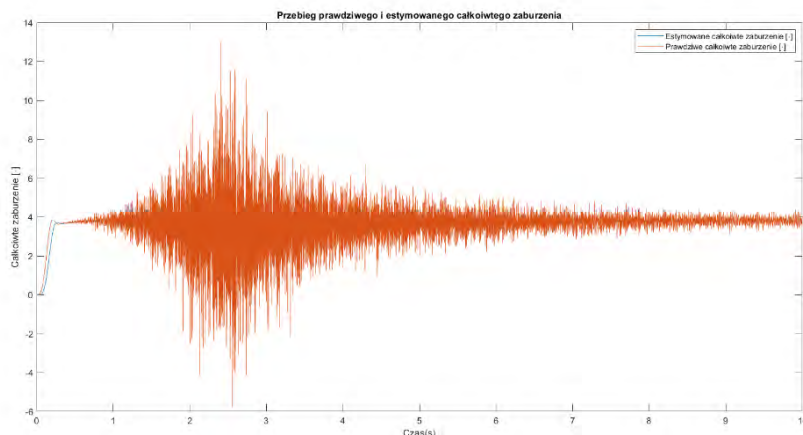
Na podstawie pierwszego przebiegu prędkości rotacji (Rys. 7) widoczne jest, że podstawowe założenia co do zniwelowania wspomnianej prędkości są spełnione. Na drugim przebiegu przedstawiony jest kąt wychylenia powierzchni sterowej. Przebiegi tych wartości fizycznych przedstawione są w zależności od liczby Macha.

W ramach symulacji została również porównana estymowana prędkość rotacji prędkością rotacji uzyskaną w trakcie symulacji w programie OpenRocket (Rys. 8).



Rys. 8. Wyniki symulacji przebiegów estymowanej i prędkości rotacji uzyskanej z symulacji oraz różnicy pomiędzy nimi

Widoczne jest, że algorytm sterowania w bardzo dobry sposób estymuje prędkość rotacji. Różnica pomiędzy wspomnianymi wartościami utrzymuje się na poziomie od -0.01 do 0.015 [rad/s]. Kolejnym ważnym wskaźnikiem słuszności doboru parametrów dla wybranego sterownika jest poprawność estymacji całkowitego zaburzenia (Rys. 9). Na wykresie widoczne jest, że estymata wspomnianej wartości zachowuje trend prawdziwego całkowitego zaburzenia. Z racji tego, że obiekt posiada dużą dynamikę oraz pasmo przenoszenia obiektu jest ograniczone, nie są przenoszone wszystkie mody występujące w obiekcie.



Rys. 9. Przebieg prawdziwego i estymowanego całkowitego zaburzenia

5. PODSUMOWANIE

Z racji tego, że stopień skomplikowania procesu jest wysoki, zastosowanie konwencjonalnych metod sterowania jest niewystarczające. W związku z tym, postanowiono wykorzystać podejście adaptacyjne. Ten wybór wiąże się z poniesieniem odpowiednich kosztów. Mianowicie ze wstępnych symulacji wynika, że okres próbkowania sterownika dla wybranego modelu musi wynosić co najmniej 1000 Hz. Efektywność algorytmu sterowania zależy również od stosunku powierzchni stateczników do elementów sterowych. Dodatkowo z racji wysokiej dynamiki konieczna jest implementacja szerokiego pasma przenoszenia. To jednak wiąże się z tym, że do sterownika mogą dostawać się znaczne zakłócenia.

Wybrana ścieżka wysterowania prędkości rotacji ogranicza się do czterech parametrów projektowych. Dzieli się one na parametry konstrukcyjne (postać geometrii rakiety) oraz sterowania. Parametrem geometrycznym jest powierzchnia powierzchni sterowej, natomiast parametrami sterowania są: pulsacja graniczna pasma przenoszenia, okres próbkowania sterownika oraz zgrubny współczynnik skalujący tor sterowania. Dobór parametrów konstrukcyjnych zostanie zakończony poprzez serię analiz numerycznych pozwalających na wyznaczenie pełnej charakterystyki aerodynamicznej obiektu, a także obliczenie wymagań wytrzymałościowych poszczególnych komponentów.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Nonweiler, T.R.F., 1961. *Missile Aerodynamics*. JW Nielsen. McGraw-Hill, New York, 1960. 450 pp. Diagrams. 97s. *The Aeronautical Journal*, 65(601), pp.65-65.
2. Fleeman, E.L., 2006. *Tactical missile design* (Vol. 468). Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
3. Niskanen, S., 2009. *Development of an Open-Source model rocket simulation software* (Master's thesis).

Artykuły w czasopismach

1. Lane, J.H. and Chalfant, C.P., 1967. Development of the Aerobee 350 sounding rocket. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 4(10), pp.1316-1322.
2. Fresconi, F., Celmins, I., Sifton, S. and Costello, M., 2015. High maneuverability projectile flight using low-cost components. *Aerospace Science and Technology*, 41, pp.175-188.
3. Kisabo, A.B., Adebimpe, A.F., Okwo, O.C. and Samuel, S.O., 2019. State-Space Modeling of a Rocket for Optimal Control System Design. In *Ballistics*. IntechOpen.
4. Hall Jr, C.E., 1989. The Modified Barrowman Method With Applications to the OPDAMS (Optical Deep Attack Missile Systems) and PDAMS (Precision Deep Attack Missile Systems) Vehicles. Army Missile Command Redstone Arsenal AI Research Directorate.
5. LaBudde, E.V., 1999. *Extending The Barrowman Method For Large Angles Of Attack*. Westlake Village, CA, USA.
6. Dormand, J.R. and Prince, P.J., 1980. A family of embedded Runge-Kutta formulae. *Journal of computational and applied mathematics*, 6(1), pp.19-26.
7. Diederich, F.W., 1950. Approximate aerodynamic influence coefficients for wings of arbitrary plan form in subsonic flow. National Aeronautics and Space Administration Hampton Va Langley Research Center.
8. Zhigiang Gao, 2002. From linear to nonlinear control means: a practical progression. *ISA Transactions*, 41:177-189.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Smith, J. and Cullina, J., 2011. CFD assessment of fin manufacturing defect to set fin cant angle and achieve nominal roll rate. In *29th AIAA Applied Aerodynamics Conference* (p. 3665).
2. Gao, Z., 2006, June. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design. In *2006 American control conference* (pp. 7-pp). IEEE.
3. Miklosovic, R., Radke, A. and Gao, Z., 2006, June. Discrete implementation and generalization of the extended state observer. In *2006 American control conference* (pp. 6-pp). IEEE.

PRELIMINARY ANALYSIS OF ACTIVE AERODYNAMIC ROLL CONTROL SYSTEM FOR SUBSONICS ROCKETS

Abstract

The article presents the model of the rotation occurring during the mission of a sounding rocket and the design process of a control system using a system of control surfaces located in front of the object's center of pressure (Canard). The analysis is based on a series of simulations with the full dynamics model (6 degrees of freedom), using simplified aerodynamic characteristics. The ADRC controller used in the sounding rocket rotation controller was selected as most suitable for the given application.

Key words: sounding rocket, rotation control, ADRC

Piotr ZACHOLSKI*
Tomasz KRAKOWSKI**

DWUSTOPNIOWY SYSTEM ODZYSKU RAKIET SONDAŻOWYCH O NAPĘDZIE HYBRYDOWYM

Artykuł opisuje fazy projektowe systemu odzysku rakiety sondażowej, pozwalającego na bezpiecznego sprowadzenie komponentów konstrukcji w strefę lądowania po przeprowadzonej misji badawczej. Kompleksowo przedstawia projekty czas spadochronów, systemu wyzwalania spadochronu głównego oraz system wyrzutu głowicy. Dodatkowo zaakcentowany jest sposób wykonania etapu wykonawczego oraz testowego prototypów przecinaka pirotechnicznego.

Słowa kluczowe: system odzysku, spadochron, rakiet sondażowa

1. WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych podsystemów rakiet sondażowych jest system odzysku. Zadaniem systemu odzysku jest bezpieczne sprowadzenie rakiety na ziemię po osiągnięciu apogeum. Pozwala na zwiększenie bezpieczeństwa misji, a dodatkowo na ponowne wykorzystanie komponentów, co znacząco obniża koszty przeprowadzanych badań. Kolejną zaletą jest możliwość sprawnego odzyskania urządzeń badawczych, ze względu na ich lokalizację w głównym korpusie rakiety. Rakiet sondażowe ze względu na niską cenę startu i możliwość szybkiego przygotowania startu są atrakcyjnym rozwiązaniem do sprawdzenia działania komponentów później w misjach orbitalnych, w warunkach panujących na pokładzie startującej rakiety [NASA 2015]. Dlatego wysoka niezawodność systemu odzysku jest tak istotnym systemem dla sukcesu misji rakiety sondażowej.

Najprostszym sposobem na wykonanie systemu jest jednostopniowy system spadochronów z pojedynczym ładunkiem pirotechnicznych, rozdzielających korpusy rakiet stosowany w rakietach modelarskie niskiej mocy [Walczewski 1982]. Rozłą-

* Koło naukowe PUT Rocketlab, Instytut Energetyki Ciepłej, Politechnika Poznańska

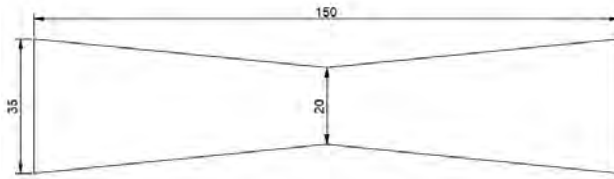
** Instytut Mechaniki Stosowanej, Politechnika Poznańska

czenie komponentów rakiety pozwala na hamowanie poprzez destabilizację konstrukcji, a także na wyzwolenie spadochronu. Innym sposobem separacji rakiety jest wykorzystywanie CO₂ w zbiornikach ciśnieniowych, które po otwarciu zapewniają ciśnieniowanie objętości komory spadochronowej [Johnson 1969]. W artykule zostanie opisany odzysk rakiety HEXY 2+, wykonany przez studencką grupę badawczą PUT Rocketlab. Składa się on z dwustopniowego systemu spadochronów i pirotechnicznych mechanizmów separacji głowicy oraz wyrzutu spadochronu głównego. Pierwszy spadochron, nazywany hamującym lub pilotującym otwierany jest po osiągnięciu apogeum przy pomocy systemu wyrzutu głowicy. Następnie rakieta (z odrzuconą głowicą) opada swobodnie na spadochronie pilotującym do osiągnięcia wysokości, na której otwierany jest spadochron główny (500 m n.p.t.). Wysokość wyzwolenia spadochronu głównego określana jest na podstawie analizy warunków meteorologicznych oraz wielkości bezpiecznego obszaru lądowania [Collins et al. 2002]. Spadochron główny otwierany jest przy pomocy wcześniej otwartego spadochronu hamującego. Przecinaki pirotechniczne, poprzez system lin oraz pasów, umożliwiają separację spadochronu pilotującego z głowicą od spadochronu głównego. W takiej konfiguracji rakieta ląduje na ziemi. W dwóch podsystemach na jakie została podzielona rakieta po wyzwoleniu spadochronu głównego, znajdują się elektroniczne układy telemetryczne, pozwalające na zlokalizowanie rakiety podczas opadania oraz ułatwiające jej odnalezienie. Zbudowanie pełnego systemu odzysku jest czasochłonne i wymaga interdyscyplinarnego podejścia, znajomości konstrukcji rakiety, rozkład mas oraz przestrzeń probabilistyczną przewidywanych parametrów w apogeum. W niekorzystnych warunkach odzysk jest fazą lotu, w której struktura rakiety wystawiona jest na największe obciążenia, co dodatkowo potwierdza konieczność wczesnej analizy i testów systemu odzysku w etapie projektowym rakiety sondażowej.

2. SPADOCHRONY

Projekt spadochronu opracowano przy użyciu wysoce zaawansowanego numerycznego optymalizatora czasów spadochronów (ang. Highly Advanced Numerical Canopy Optimizer- HANCO) przygotowanego na potrzeby wcześniejszych projektów studenckiej grupy badawczej PUT Rocketlab [Hałupka i Mosiężny 2020].

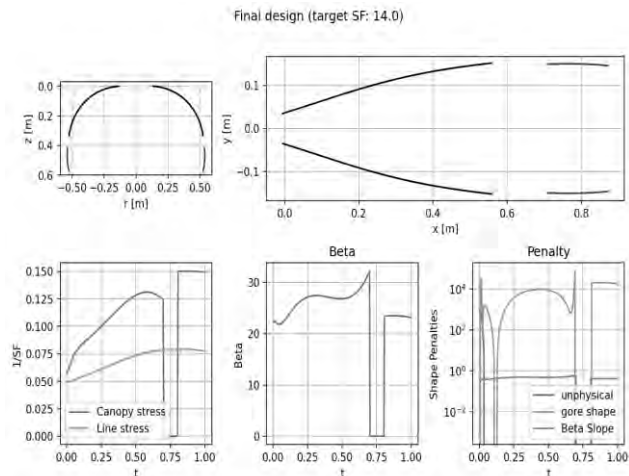
Dla odpowiedniego działania algorytmu należy przyjąć dane wynikające z wcześniej przeprowadzonych testów wytrzymałości materiału oraz lin. Tensometryczne pomiary siły zrywającej wykonywane są na próbkach o stałej geometrii, wycinanych wzdłuż (0°), poprzecznie (90°) oraz mieszanie (45°) względem układu włókien materiału (Rys. 1). Pomiary wykonywane są w sposób ciągły, siłą zwiększaną w tempie 10 N/s, następnie są dyskretyzowane i wyszukiwana jest siła zrywająca próbkę.



Rys. 1. Wymiary geometryczne próbki materiału

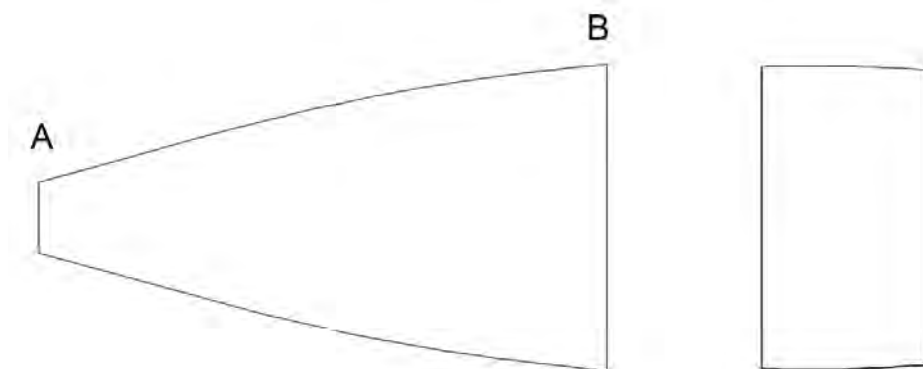
Każda próbka do testów jest wycinana na ploterze laserowym w celu zachowania wysokiej powtarzalności wymiarowej, poprawiającej jednorodność testów. Podczas testów materiału Nylon Ripstop, o gramaturze 42g/m^2 , zaobserwowano wysoką anizotropię materiału (20% rozbieżności). Ważnym aspektem jest balans między gramaturą materiału i wytrzymałością. Kryterium doboru materiału jest iloraz wytrzymałości na rozciąganie materiału do jego masy. Niezbędne jest szczegółowy dobór lin, które poza spełnieniem wymagań wytrzymałościowych powinny mieć wysoką odporność na ścieranie oraz bardzo dobrą odporność na promieniowanie UV. Wymagania te wynikają z agresywnego środowiska pracy, które może spowodować degradację materiałów polimerowych.

Kolejne dane, wprowadzane do algorytmu projektowego to ograniczenia projektowe i technologiczne, takie jak: liczba lin podczasowych, szerokość zakładki na szew, który łączy ze sobą kolejne pasma czaszy, średnica czaszy po napełnieniu spadochronu, szerokość kominka poprzez jego udział proporcjonalny do średnicy końcowej czaszy, długość przerwy pomiędzy dyskiem a pasem. Po zidentyfikowaniu i wybraniu wyżej wymienionych danych algorytm wizualizuje tablice z danymi najlepszego osobnika (Rys. 2) oraz generuje pliki graficzne, dzięki którym wytwarzane są formatki do wycinania pasm.



Rys. 2. Przykładowe wyniki działania algorytmu, źródło: [Hałupka i Mosiężny 2020]

Wytwarzanie spadochronu polega na zszyciu przygotowanych wykrojek materiałowych wraz z linami. Linę mocuje się za pomocą kleju do wykrojki od strony punktów A i B (Rys. 3), a następnie kolejną wykrojkę nakleja się na wcześniejszą wykrojkę (z liną). W punkcie A linka wychodząca musi mieć długość przynajmniej 50 mm, aby możliwe było zawiązanie na niej pętli. Natomiast liną wychodzącą z punktu B jest dłuższa. Przygotowany nadmiar liny uwzględnia długość liny w przerwie (153 mm), długość bocznej krawędzi pasa (165 mm) oraz 50 mm liny dla dolnej pętli, która zostanie wykorzystana do przywiązania lin podczasowych.



Rys. 3. Kształt wykrojki dla spadochronu typu DGB (ang. Disk Gap Band)

Sklejone pasma zszywamy trójskokiem [Krasowska 2009]. Podane czynności wykonujemy w zależności od ilości pasm w danym projekcie spadochronu. Przy 12 linach podczasowych potrzeba 12 operacji/sekwencji. Dolne i górne krawędzie pasm dysku oraz pasa mają dodatkowe zakładki, które służą jako wzmocnienie materiału i gwarantują większą wytrzymałość na rozerwanie się materiału na obydwu końcach pasm.

Po zszyciu całego spadochronu należy związać kominek jedną dłuższą linką przechodzącą przez każdą pętlę oraz równej długości odcinki linki, które łączą naprzeciwległe pętelki (przy parzystej ilości linek). Do dolnych pętelek należy przywiązać równej długości liny podczasowe i na samym ich końcu połączyć je w jedną pętlę.

W projekcie Hexa 2+ zaprojektowane przy pomocy HANCO i wykonane zostały dwa spadochrony (Rys. 4). Jeden pilotujący z Nylonu Ripstop o gramaturze 42g/m², liny użyte do jego produkcji to liny syntetyczne o wytrzymałości 2.94 kN, liczba lin podczasowych to 12, szerokość zakładki na szew wynosi 17 mm, średnica czaszy po napełnieniu osiąga 1050 mm, udział szerokości kominka w średnicy czaszy po napełnieniu to 10% i długość przerwy pomiędzy dyskiem, a przerwą wynosi 10% długości liny klinowej. Drugi spadochron, to spadochron główny o średnicy 3250 mm. Względem spadochronu pilotującego zmianie uległ materiał na Nylon Ripstop

o mniejszej gramaturze (32g/m^2) oraz długość przerwy pomiędzy dyskiem, a pasem. Mianowicie wynosi ona 8% długości liny klinowej.



Rys. 4. Wizualizacje projektu spadochronu hamującego

Znaczącym wyzwaniem jest przetestowanie spadochronów (zwłaszcza pilotującego), ze względu na trudności wiarygodnego modelowania zjawisk występujących w trakcie otwarcia i inflacji spadochronu. Najlepszym testem spadochronu jest eksperymentalne sprawdzenie działania, co w przypadku złożonych rakiet z hybrydowym silnikiem możliwe jest z wykorzystaniem startów w skali na silnikach na paliwo stałe. Przygotowane spadochrony hamujących zostały szeroko przetestowane w rakietach serii S4L4MI autorstwa studenckiej grupy badawczej PUT Rocketlab.

Dodatkowo przeprowadzono testy naziemnego rozkładania spadochronów pilotującego i głównego, w celu badania działania układu olinowania. Dla bezpiecznego przechowywania spadochronu pilotującego podczas lotu rakiety, a także w chwili separacji i ciśnieniowania objętości wewnętrznej główicy przez gazy prochowe został zaprojektowany worek ochronny. Na osłonie znajdują się 3 pary rozciągliwych pasów, przez które przekładane są linki podczaszowe i układane są w symetryczne pętle, dzięki którym w kontrolowany sposób są one rozciągane. Pozwala to przeciwdziałać płątaniu się lin. Dla dodatkowej ochrony spadochronu przeciwko gazom prochowym zastosowano przekładki materiałowe z Nomexu. Do ochrony spadochronu głównego zastosowana analogiczny układ worka ochronnego, wraz z przekładkami Nomexowymi.

3. SYSTEM SEPARACJI KOMPONENTÓW RAKIETY

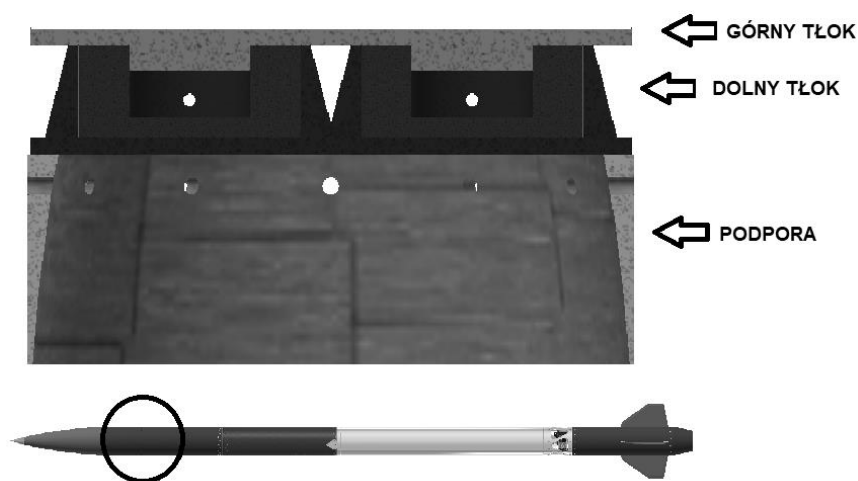
W rakiecie Hexa 2+ separacja następuje poprzez odrzucenie główicy (Rys. 5). Celem jest wyrzut spadochronu hamującego na docelowym pułapie (blisko apogeum). Wybór miejsca podziału rakiety jest kluczowy, ze względu na wysoki wpływ na generowane obciążenia konstrukcji nośnej oraz dynamikę lotu na spadochronach (ryzyko płątania lin i zmniejszenia skuteczności spadochronów).



Rys. 5 Wizualizacja rakiety HEXA 2+

Miejsce dzielenia komponentów rakiety jest dyktowane założeniami konstrukcyjnymi lub przystosowaniem do wyrzutu ładunku w poszczególnych fazach lotu. Wybór miejsca, w którym dochodzi do rozdzielenia głowicy z korpusem Hexy 2+ został uwarunkowany występowaniem najmniejszych sił gnących w miejscu separacji. Wybór miejsca ma wady, związane z niską utratą stateczności aerodynamicznej przy wysokich prędkościach w apogeum, w porównaniu z separacją w środkowej części rakiety. Utrata stateczności po osiągnięciu apogeum jest pożądana, ponieważ zapewnia ona łatwiejszy odzysk w wyższych warstwach atmosfery (poprzez zmniejszenie prędkości opadania).

System wyrzutu głowicy jest zbudowany z dwóch połączonych elementów, nazywanych górnym oraz dolnym tłokiem oraz jednej stałej części, służącej za podporę dla układu tłoków. Złożenie przedstawiono na wizualizacji (Rys. 6).



Rys. 6 Wizualizacja systemu wyrzutu głowicy

Rura odzyskowa ma 750 mm długości i jest wykonana z kompozytu włókna węglowego z osnową z żywicy termoutwardzalnej, z przekładką papierowo-keklarową o strukturze plastra miodu. W rurze odzysku zostały wykonane otwory pozycjonujące podporę na wysokości 525 mm względem dolnej części rury. Dolna część tłoczka jest wykonana technologią druku 3D z PLA metodą przyrostową FDM (ang. fused deposition modeling - osadzanie topionego materiału), które zostało wyżarzone

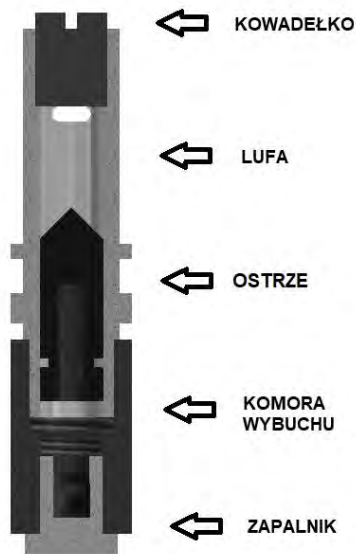
w celu uzyskania większej wytrzymałości. Dla uzyskania dodatkowego wzmocnienia zastosowano wzmocnienie ze sklejki o grubości 4 mm, mającej przeciwdziałać złamaniu tłoczka przy wybuchu ładunku. Górna część tłoczka ma analogiczną konstrukcję.

W dolnej części tłoczka znajdują się dwa modułowe elementy - moździerz, w których umieszczone są ładunki prochowe oraz główka zapalnika. Zapalnik jest unieruchamiany poprzez przyklejenie do wewnętrznej ściany moździerza. Ładunek prochowy przygotowuje się poza rakieta i dopiero po związaniu olinowania można wprowadzić zabezpieczony ładunek. Dla redundancji systemu wprowadza się dwa ładunki o masie 6 g, podłączone do dwóch w pełni niezależnych komputerów pokładowych, które po wykryciu apogeum dają sygnał do aktywacji zapalników. W tłokach występują otwory przelotowe, przez które przechodzą liny do spadochronu hamującego oraz lina do wyciągania spadochronu głównego. Liny na odcinku 350 mm przy przelocie są zabezpieczone osłoną kevlarową. Po wybuchu ładunku prochowego następuje ciśnieniowanie komory pomiędzy dwoma częściami tłoczka. Powoduje to wyrzut głowicy, górnej części tłoka oraz olinowania i spadochronu pilotującego, który po wyrzucie zaczyna się napełniać powietrzem.

4. SYSTEM WYZWOLENIA SPADOCHRONU GŁÓWNEGO

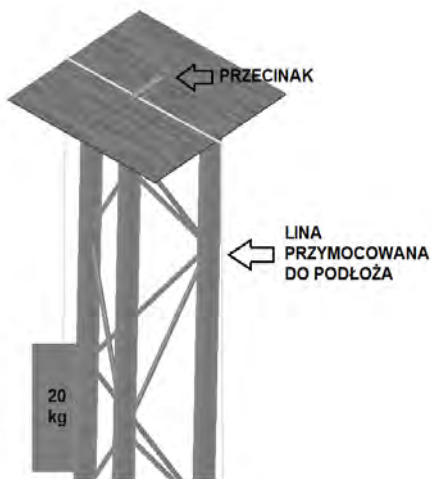
Po wyzwoleniu spadochronu hamującego w apogeum następuje faza opadania. Rakieta opada na pilotce ze średnią prędkością około 27 m/s do 500 m względem wysokości, na której ustawiona jest wyrzutnia. Na tym pułapie następuje wyciągnięcie z korpusu rakiety spadochronu głównego. Działanie przecinaków pirotechnicznych powoduje przecięcie lin blokujących wysunięcie worka ze spadochronem głównym z korpusu rakiety. Redundancja działania systemu oparta jest na wykorzystaniu 2 niezależnych przecinaków pirotechnicznych.

Pierwsza wersja pirotechnicznego przecinaka uzyskała gotowość do wykorzystania w układzie odzysku. Optymalizacja przecinaka ukierunkowana została na zmniejszenie masy oraz przyjęcie odpowiedniego kształtu ostrza do materiału liny, a także uszczelnienia lufy. Finalna wersja przecinaka pirotechnicznego waży 40 g i jest przedstawiona wizualizacji (Rys. 7).



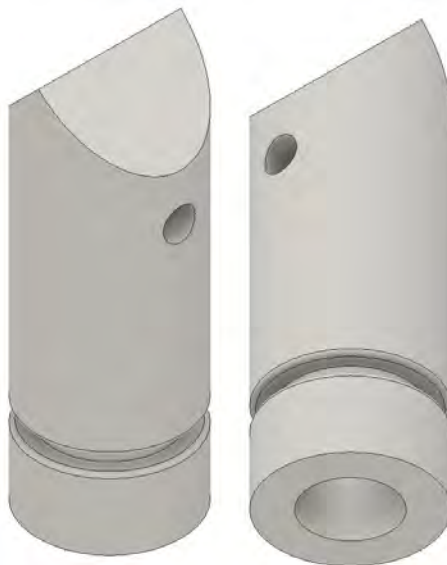
Rys. 7. Wizualizacja przycinaka pirotechnicznego

Przeprowadzonych zostało 50 testów jednostkowych z wykorzystaniem dwóch wersji stanowiska testowego. Stanowisko Alpha, w którym napięcie liny realizowane jest z wykorzystaniem ścisków. Powoduje to brak powtarzalności w uzyskiwanym napięciu liny. Dlatego w wersji Beta stanowiska wprowadzono znaną masę napinającą linę 20 kg. Wielkość obciążenie wynika z minimalnej możliwej masy w fazie opadania (Rys. 8).



Rys. 8. Wizualizacja stanowiska testowego Beta

Podczas testów w konfiguracji zmieniano wersje przecinaków, masę ładunku prochowego, wytrzymałość liny oraz rodzaj ostrza. Docelową wersję przecinaka przedstawiono na wizualizacji (Rys. 9).



Rys. 9. Wizualizacja ostrza do przecinaka pirotechnicznego

Poniżej tabelę, z konfiguracją przecinaków podczas testów, podzielone zostały na dwie części, w pierwszej części (Tab. 1) do produkcji ostrza użyto stali 1.1191 (C45) [PN-EN 10027-2], bez dodatkowej obróbki cieplnej, dlatego po każdym teście konieczna była korekta krawędzi ostrza tnącego linę. W drugiej części testów (Tab. 2) do produkcji ostrzy użyto stali 1.4021 (X20Cr13) [PN-EN 10027-2], która następnie została zahartowana w oleju i odpuszczona wysoko w temperaturze 650⁰ C.

W celu zmniejszenia masy ostrza wydrążony został kanał przechodzący przez jego centralną oś, drugi poprzeczny otwór pozwala na kątowe pozycjonowanie ostrza względem liny oraz liniowe względem lufy przecinaka. Ostrze posiada także kanał na uszczelnienie teflonowe. Elementy przecinaka wykonywane są w klasie tolerancji IT12 [DIN ISO 286].

Wyniki testów przecinaka z ostrzem ze stali AISI 1045

L.p.	Wersja przecinaka	Masa prochu w komorze [g]	Wytrzymałość liny [kg]	Wersja stanowiska testowego
1	1	3,03	300	Alpha
2	1	2,42	300	Alpha
3	1	2,23	300	Alpha
4	1	2,02	300	Alpha
5	1	1,55	300	Alpha
6	1	1,51	300	Alpha
7	1	1,2	300	Alpha
8	1	1,02	300	Alpha
9	1	1,03	300	Alpha
10	1	1,01	300	Alpha
11	1	1,02	300	Alpha
12	1	0,99	300	Alpha
13	2	2,51	300	Alpha
14	2	2,02	300	Alpha
15	2	1,82	300	Alpha
16	2	1,6	300	Alpha
17	2	1,5	300	Alpha
18	2	1,4	300	Alpha
19	2	1,49	300	Alpha
20	2	1,5	300	Alpha
21	2	1,51	1000	Alpha
22	2	2,01	1000	Alpha
23	2	2,5	1000	Alpha
24	2	3,34	1000	Alpha
25	2	3,23	1000	Alpha

Wyniki testów przecinaka z ostrzem ze stali AISI 420 C

L.p.	Wersja przecinaka	Masa prochu w komorze [g]	Wytrzymałość liny [kg]	Wersja stanowiska testowego
26	2	2,57	1000	Beta
27	2	1,54	1000	Beta
28	2	1,51	1000	Beta
29	2	1,48	1000	Beta
30	3	0,6	1000	Beta
31	3	0,82	1000	Beta
32	3	0,69	1000	Beta
33	3	0,61	1000	Beta
34	3	0,51	1000	Beta
35	3	0,54	1000	Beta
36	4	0,51	1000	Beta
37	4	0,41	1000	Beta
38	4	0,42	1000	Beta
39	4	0,43	1000	Beta
40	4	0,4	1000	Beta
41	4	0,4	1000	Beta
42	4	0,42	1000	Beta
43	4	0,39	1000	Beta
44	4	0,42	1000	Beta
45	4	0,41	1000	Beta
46	4	0,42	1000	Beta
47	4	0,4	1000	Beta
48	4	0,42	1000	Beta
49	4	0,4	1000	Beta
50	4	0,42	1000	Beta

5. PODSUMOWANIE

Po przeanalizowaniu literatury na temat odzysku rakiet sondażowych zostały zaprojektowane oraz wykonane podsystemy odzysku, które są dedykowane do rakiet sondażowych o średnicy 160 mm. Jednak po przeskalowaniu i wykonaniu testu możliwe jest dostosowanie ich do średnicy korpusu. Przy projektowaniu podsystemów ważnym aspektem była kontrola nad zależnościami pomiędzy każdym z podsystemów i świadomość, że zmiana w jednym podsystemie wpływa bezpośrednio na całe działanie odzysku oraz innych systemów rakiety.

Każdy z podsystemów był zaprojektowany z myślą o jak największej niezawodności oraz powtarzalności, z tego powodu wszystkie z podsystemów były testowane

pojedynczo oraz w sposób zintegrowany. Po pierwszych testach podsystemów wprowadzone zostały poprawki w celu zoptymalizowania działania oraz zwiększenia ich niezawodności. Niektóre z elementów podsystemu wymagają większej ilości zmian i modyfikacji, w celu zagwarantowania oczekiwanej niezawodności. Przykładem takiego komponentu jest przecinak pirotechniczny, jest to spowodowane koniecznością przystosowania do zmiennych warunków pracy i osiągnięcia wysokiej powtarzalności. Stanowiska testowe oraz same testy wykonywane były w taki sposób, aby jak najlepiej oddać rzeczywiste warunki panujące podczas lotu rakiety oraz ich pracy. Po przeprowadzeniu testów każdego z podsystemów można stwierdzić, że każdy moduł systemu działa poprawnie i jest przygotowany do pełnego złożenia oraz lotu.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. NASA Sounding Rockets User Handbook. Wallops. VA: NASA Goddard Space Flight Center, 2015
2. Walczewski, J. 1982. Polskie rakiety badawcze, Biblioteczka Skrzydlatej Polski, tom XV, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności

Artykuły w czasopismach

1. Johnson, D.W., 1969. Development of recovery systems for high-altitude sounding rockets. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 6(4), pp.489-491.
2. Collins, J.D., Haber, J.M., Baeker, J.B. and Wilde, P.D., 2006. Controlling the Risks to the Public from the Consequences of Large Rocket Launch Failures. In *Earth & Space 2006: Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environment* (pp. 1-8).
3. Krasowska, R., 2009. Wpływ warunków pracy tarczowego podciągacza nici na charakterystykę ściegu czółenkowego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. Włókiennictwo*, Vol. 65, No. 1038, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2009, ISSN 0076-0331.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Hałupka, M. i Mosiężny, J., 2020. Projekt i analiza CFD spadochronu do rakiety sondażowej

Normy

1. DIN-ISO 286: Tolerancje podstawowe
2. PN-EN 10027-2: Systemy oznaczania stali -- Część 2: System cyfrowy

TWO-STAGE RECOVERY SYSTEM OF HYBRID SOUNDING ROCKETS

The article describes the design phases of the recovery system of the sounding rocket, allowing to bring the components of the structure safely to the landing zone after a research mission. It comprehensively presents the designs of the parachute canopy, the main parachute release system and the nose cone ejection system. In addition, the implementation of the execution and test stages of the pyrotechnic cutter prototypes is emphasized.

Keywords: rocket recovery, parachute, sounding rocket

Joanna ZEMBRZUSKA*
Paweł RYCHLEWSKI*
Elham KAMGAR*

ŹRÓDŁA I KONSEKWENCJE OBECNOŚCI ANTYBIOTYKÓW W ŚRODOWISKU

Występowanie antybiotyków w środowisku jest związane z ich właściwościami chemicznymi i farmakokinetycznymi. Związki te w ekosystemach mogą ulegać zmianom i prowadzić do mutacji bakterii powodujących ich antybiotykooporność. Ważnym wsparciem dla regulacji obecności antybiotyków w środowisku jest wyjaśnienie związku przyczynowego między ich obecnością a wpływem na ekosystem. W związku z tym dokładne wykrywanie i oznaczanie ilościowe antybiotyków występujących w środowisku oraz związków o potencjalnej aktywności biologicznej stanowiłoby ważny krok w tworzeniu bazy naukowej. Wyniki badań dotychczas przeprowadzonych zachęcają do kontynuowania i poszerzania prac badawczych w celu wnikliwego monitorowania i zrozumienia zachowania antybiotyków w ekosystemach.

Słowa kluczowe: antybiotyki, antybiotykooporność

* Instytut Chemii i Elektrochemii Technicznej Zakład Chemii Ogólnej i Analitycznej Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska

1. WPROWADZENIE

Wraz z rozwojem chemii człowiek nauczył się syntetyzować oraz pozyskiwać ze środowiska naturalnego substancje lecznicze, które przyczyniły się znacząco od ubiegłego stulecia do wydłużenia średniej czasu życia. Jakość ludzkiego życia również diametralnie wzrosła z uwagi na coraz większą dostępność leków wykorzystywanych w terapiach chorób i schorzeń, które przez kilka wieków dziesiątkowały ludzką populację.

Prawdziwy przełom w medycynie przyniosło odkrycie antybiotyków, czyli związków, które eliminują większość bakterii, grzybów oraz wirusów. Za początek ery antybiotykoterapii uznaje się rok 1928, kiedy szkocki bakteriolog Alexander Fleming przeprowadzał eksperymenty nad szczepami bakterii z rodzaju *Staphylococcus* [Lalchhandama 2020]. Badacz w lipcu 1928 roku udał się na wakacje, pozostawiając w laboratorium płytki agarowe z rozwijającymi się kulturami bakteryjnymi. 3 września wraz ze swoim współpracownikiem przeglądał uzyskane kolonie. Zauważyli wówczas, że jedna z płytek została przypadkowo zakażona strzępkami grzybnia z rodzaju *Penicillium chrysogenum*, w wyniku czego część rosnącej kolonii bakterii obumarła. Pod koniec 1929 roku Fleming opublikował wyniki swoich badań w *British Journal of Experimental Pathology*, a kilka lat później w skutek intensywnych prac wyizolował penicylinę-G [Lalchhandama 2020]. Okazało się, że nowo odkryty związek działa silnie bakteriobójczo, jednocześnie będąc łagodnym dla ludzkiego organizmu. Dalsze badania zostały jednak wstrzymane, najpierw z powodu braku funduszy, później zaś na skutek toczącej się II wojny światowej. Dopiero po jej zakończeniu Flemingowi wraz z Howardem Floreyem i Ernstem Chainem udało się wyizolować penicylinę w ilości wystarczającej do przeprowadzenia szczegółowych badań. Za to dokonanie cała trójka badaczy została w 1945 roku uhonorowana Nagrodą Nobla w dziedzinie medycyny.

Początkowo świat bardzo entuzjastycznie przyjął informację o odkryciu związków umożliwiających leczenie ciężkich chorób bakteryjnych, takich jak: cholera, dżuma czy błonica. Jednakże z czasem pojawił się problem antybiotykoodporności rozwijający się u drobnoustrojów, które coraz częściej miały kontakt z penicylinami i innymi grupami antybiotyków. Okazało się, że nadmierne stosowanie tych leków powoduje uodpornienie się bakterii poprzez zmiany w genomach, umożliwiające rozkładanie farmaceutyków i pozyskiwanie z nich energii chemicznej. Z tego powodu z czasem odkrywano nowe związki o działaniu bakteriobójczym oraz modyfikowano chemicznie te już znane, aby nadal mieć oręż do walki z patogennymi drobnoustrojami [Popowska 2017].

Początkowo antybiotyki stosowane były tylko w leczeniu szpitalnym, jednakże wraz z rozwojem medycyny i komercjalizacją tej dziedziny nauki leki trafiały do aptek na całym świecie. Lekarze nagminnie wypisywali recepty i traktowali nowe

medykamenty jako remedium na wszystkie choroby. Bezmyślne stosowanie penicylin z czasem doprowadziło do zmian w genomach wielu gatunków bakterii, które zaczęły ewoluować w kierunku lekooporności, co znacznie utrudniało leczenie podstawowych schorzeń. W dzisiejszych czasach pomimo ugruntowanej wiedzy medycznej o zależnościach między antybiotykami a reakcjami bakterii sytuacja nie uległa dużej poprawie, a antybiotyki nadal są zalecane przez medyków bez większej refleksji. Duży problem stanowi również weterynaria, w której penicyliny czy tetracykliny stosuje się profilaktycznie u zwierząt nawet, gdy brak jest widocznych oznak zakażenia.

2. ŹRÓDŁA ANTYBIOTYKÓW W ŚRODOWISKU

Każda substancja, która dostaje się do organizmu żywego, musi zostać prędzej czy później z niego usunięta w formie niezmienionej lub jako metabolity. Czas, który jest potrzebny do zneutralizowania połowy pochłoniętej dawki jakiegoś leku nazywany jest czasem półtrwania i zależy od wielu czynników, takich jak między innymi: stopień skomplikowania cząsteczki, masa człowieka lub zwierzęcia, wiek organizmu, zdolności detoksykacyjne enzymów wątrobowych. Większość metabolitów wydalana jest wraz z moczem lub kałem, które trafiają bezpośrednio do środowiska (w przypadku zwierząt) lub pośrednio poprzez oczyszczalnie ścieków (w przypadku człowieka). Poza metabolitami szerokim problemem jest również utylizacja leków, która nie zawsze przebiega według ogólnie przyjętych norm. Nagminnie dochodzi do sytuacji, w których ludzie podczas porządków wyrzucają do swoich przydomowych pojemników przeterminowane substancje lecznicze [Iuliana, Gurzau i Kiss, 2002]. Fakt ich przeterminowania nie zmienia tego, iż po przedostaniu się do środowiska naturalnego wywołują chemiczne zanieczyszczenie, które niesie za sobą szereg niebezpiecznych konsekwencji [Sanderson, Johnson 2004].

Wraz ze wzrostem stosowania leków, wzrasta ich poziom w wodzie gruntowej, w glebie, w rzekach czy nawet w powietrzu. Znacząca większość medykamentów, które w ilościach śladowych powszechnie występują w środowisku to niesteroidowe leki przeciwzapalne (np. diklofenak, ibuprofen, naproksen, kwas acetylosalicylowy), beta-blokery (leki obniżające ciśnienie tętnicze) leki psychotropowe i przeciwdepresyjne, hormony ludzkie i zwierzęce oraz antybiotyki (np. erytromycyna, trimetoprim, sulfametoksazol, penicyliny) [Larsson 2014]. Obecność tych związków w wodach, między innymi w wodzie pitnej, powoduje szereg niekorzystnych skutków ubocznych, takich jak: stopniowe uodparnianie się społeczeństwa na działanie przeciwzapalne ibuprofenu, przeciwbólowe aracetamolu lub uodpornianie bakterii na antybiotyki starych i nowych generacji [Baus, Michalska, 2018].

2.1 Oczyszczalnie ścieków

Głównym zadaniem oczyszczalni ścieków na całym świecie jest oczyszczanie wody z fekaliów, chemikaliów, zanieczyszczeń przemysłowych i pyłów, które szerokimi strumieniami spływają z fabryk, szpitali czy gospodarstw domowych. Wśród zanieczyszczeń znajdują się ogromne ilości żywej biomasy w postaci bakterii, które w środowisku ściekowym namnażają się bez żadnej kontroli. Dopiero w oczyszczalniach, które przystosowane są technologicznie do biologicznej i chemicznej degradacji niektórych organicznych i nieorganicznych zanieczyszczeń, bakterie zostają w większości unieszkodliwione. To, co stanowi zasadniczy problem, to obecność w skażonej wodzie substancji leczniczych pochodzenia antropogenicznego [Baus, Michalska, 2018]. Do tej pory nie opracowano dostatecznie wydajnych technologii, które pozwalałyby na usunięcie ze ścieków leków, nie mówiąc już o ich ewentualnym odzyskiwaniu [Popowska 2017].

Oczyszczalnie ścieków mają szczególne znaczenie w światowym szerzeniu antybiotykooporności, na co wskazują wyniki wielu prac naukowych. W ściekach powszechnie występują duże ilości patogennych drobnoustrojów, które w kontakcie z chemiczną zupą płynącą do oczyszczalni, rozmnażają się i wymieniają materiał genetyczny między sobą. Część z tych mikroorganizmów z czasem rozwija mechanizmy obronne w odpowiedzi na niekorzystne warunki środowiska w postaci środków bakteriobójczych. Prowadzi to do stopniowego przekazywania genów oporności w miarę rozwoju kolonii bakteryjnych. Z uwagi na obecność w ściekach całej gamy medykamentów bakterie nieustannie muszą zmieniać genetyczne mechanizmy przystosowawcze, aby móc przetrwać. Prowadzi to do wykształcenia oporności nie tylko na konkretne substancje lecznicze, ale na całe ich grupy. Szacuje się, iż stężenie antybiotyków w ściekach waha się w przedziale od 0.08 - 6 $\mu\text{g/L}$ w zależności od stopnia urbanizacji i regionu świata, w którym przeprowadzano badania [Iuliana, Gurzau i Kiss, 2002].

Oczyszczanie wody skażonej fekaliami odbywa się na drodze różnorodnych procesów chemicznych, fizycznych bądź biologicznych. Ich celem jest usunięcie jak największej ilości wszelkich zanieczyszczeń, zostawiając w niej jedynie jony soli, których separacja jest niezwykle kosztowna. Do najczęściej stosowanych rozwiązań technologicznych zaliczyć można: filtrację, stosowaną w celu usunięcia cząstek stałych oraz zawiesin; ozonowanie i chlorowanie, które umożliwiają neutralizację większości mikroorganizmów czy koagulacja, stosowana do usuwania bardzo małych cząstek [Chaturvedi, Giri i Shakle 2021].

Poza tymi metodami prężnie rozwijana jest gałąź technologiczna, w której do usuwania fekaliów i niechcianych związków używa się bakterii. Stosuje się je jako osad czynny znajdujący się na powierzchni zbiorników oczyszczanej cieczy. Skład

osadu, populacja mikroorganizmów oraz dostęp do dostatecznych ilości tlenu są regularnie monitorowane przez pracowników, aby procesy uzdatniania zachodziły z największą możliwą efektywnością [Popowska 2017].

W osadach czynnych największy udział stanowią bakterie G-dodatnie z rodzaju *Proteobacteria*, *Bacteroides*, *Chloroflexi*, *Planctomycetes* oraz *Actinobacteria*. Obecność tych konkretnych mikroorganizmów umożliwia degradację większości związków: organicznych, aromatycznych, azotowych i fosforowych; co jest bardzo kosztowne przy pomocy tylko procesów fizycznych lub chemicznych. W wyniku degradacji cząsteczek, antybiotyki mogą mineralizować do dwutlenku węgla bądź zachodzą w ich strukturze przemiany prowadzące do zmiany charakteru związku z hydrofilowego na hydrofobowy i odwrotnie. Poza samymi lekami tą metodą można neutralizować również ich metabolity, pochodzące z przemian enzymatycznych [Chaturvedi, Giri i Shakle 2021].

Drugim procesem przeprowadzanym przez bakterie jest sorpcja substancji ze środowiska. Na drodze tego procesu niektóre antybiotyki są zatrzymywane w osadzie lub na złożu aktywnym, co pozwala je usunąć. Jednocześnie w ten sposób można selekcjonować szczepy odporne na poszczególne związki i szukać metodami laboratoryjnymi nowych leków. Warto zauważyć, że obie metody oczyszczania wody z antybiotyków są mało skuteczne, a w przypadku takich związków jak erytromycyna czy tetracyklina degradacja lub sorpcja nie zachodzi wcale. Wynikiem tego jest uwalnianie z oczyszczalni wody zawierającej pewne ilości leków, które z czasem akumulują się w ekosystemach wodnych i glebowych.

2.2 Gleba, rolnictwo i hodowla zwierząt

Gleba, będąca mieszaniną rozdrobnionych i użyźnionych próchnicą skał, pełni podstawową rolę w ekosystemie. Akumulują się w niej składniki odżywcze i minerały niezbędne roślinom do prawidłowego wzrostu i rozwoju. Ziemię można uznać za swoisty wielki bioreaktor, w którym nieustannie zachodzą przemiany różnych związków i struktur morfologicznych oraz genetycznych drobnoustrojów. Niestety wraz z rozwojem rolnictwa zanieczyszczenie tej sfery planety wzrosło diametralnie, z powodu nieodpowiedniego użycia środków ochrony roślin, hormonów, antybiotyków oraz nawozów. Wszystkie te związki za pośrednictwem wód gruntowych przedostają się do jezior, rzek, strumieni, a w konsekwencji do naszych kranów [Boroń i Pawlas 2016].

Kolejnym źródłem medykamentów w środowisku były pasze dla zwierząt, które sztucznie wzbogacano antybiotykami. Weterynarze zalecali takie działania, aby przeciwdziałać epidemiom wśród bydła i, aby maksymalizować produkcję mięsa. Podobnie jak w przypadku człowieka, metabolity leków u zwierząt wydalane są

wraz z kałem oraz moczem, które dostają się do środowiska naturalnego. Nadmierna podaż leków w paszach niekorzystnie wpływa również na jakość mięsa, które wprowadzane jest na rynek. W ubojniach i rzeźniach następuje kolejny etap skażenia środowiska, ponieważ zwierzęce płyny ustrojowe mogące zawierać znaczne ilości antybiotyków oraz ich metabolitów spływają bezpośrednio do kanalizacji. Leki pozostają również w tkankach zwierzęcych, które wysyłane są do sklepów [Popowska 2017].

W roku 2006 zabroniono stosowania w paszach dla zwierząt dwóch podstawowych antybiotyków – amoksycyliny, erytromycyny oraz stymulatorów wzrostu. Nie zmienia to jednak faktu, że do 2006 roku 90% stosowanych w rolnictwie i hodowli zwierząt antybiotyków była podawana profilaktycznie, a jedynie około 10% przypadków ich użycia wynikał z chorób. Dane statystyczne szacują ilość uwolnionych do środowiska antybiotyków na 1 milion ton w ciągu ostatnich 50 lat. Ponad połowa, czyli ponad 500 tys. ton, pochodziła właśnie z rolnictwa oraz weterynarii. Fakt tak ogromnego zużycia tych leków wynikał z dążenia do maksymalizacji zysków ze sprzedaży zboża lub mięsa. Antybiotyki używane przy produkcji pasz zwierzęcych do roku 2006 w Unii Europejskiej wymieniono w tab. 1 [Popowska 2017].

Tabela 1

Wykaz antybiotyków dodawanych do pasz na przestrzeni kilkudziesięciu lat [Lathers 2001]

L.p.	Nazwa antybiotyku	L.p.	Nazwa antybiotyku
1	Bacytracyna	11	Tiamulina
2	Awilamycyna	12	Oksytetracyklina*
3	Erytromycyna*	13	Nowobiocyna
4	Bambermycyna*	14	Nystatyna
5	Chlorotetracyklina*	15	Oleandomycyna
6	Monezyna	16	Spiramycyna
7	Linkomycyna*	17	Salinomycyna
8	Hygromycyna	18	Tylozyna
9	Gryzeofulwina	19	Penicylina*
10	Kormogrizyna	20	Neomycyna*

*Pogrubiona czcionką zaznaczono substancje stosowane zarówno w leczeniu zwierząt oraz ludzi.

Poza antropogenicznym źródłem antybiotyków w glebie są również źródła naturalne. Niektóre bakterie glebowe i grzyby zdolne są do wytwarzania substancji bakteriobójczych, na które same są odporne. W ten sposób spowalniają wzrost kultur bakteryjnych innych nieodpornych gatunków i zwiększają swój zasięg. Przedstawicielami omawianej grupy są drobnoustroje z rodzaju: *Streptomyces spp.*,

S. griseus (wytwarzające streptomycynę); *S. spectabilis* (spektynomycyna), *S. erytherus* (erytromycyna, tetracyklina), *S. aureofaciens* (chloramfenikol, wankomycyna, teikoplanina), *Micromonospora spp.* (cefalosporyny), *Bacillus spp.* (bactracyna, gramicydyna, polimyksyny) [Popowska 2017].

Średnie stężenie antybiotyków w glebie wynosi od 0.8 – 2700 µg/kg. Wartości nie są bardzo wysokie, jednakże wykazano, że nawet subtelne stężenia środków bakteriobójczych mają znaczący wpływ na bakterie i przyczyniają się do rozwoju lekooporności. Znacznie gorzej sytuacja się ma w stawach hodowlanych, gdzie stężenia tych leków osiągają nawet kilkaset miligramów na kg osadu z dna zbiornika. Warstwa mułu pełniąc rolę swoistego sorbentu ma pewną pojemność, po przekroczeniu której duże ilości antybiotyków przedostają się do głębszych warstw gleby oraz do wód gruntowych i podziemnych.

3. DEGRADACJA ANTYBIOTYKÓW

Znaczna część stosowanych w medycynie antybiotyków jest tylko częściowo metabolizowana w komórkach organizmów ludzkich bądź zwierzęcych. Większość z nich przedostaje się do wód, a powstające metabolity, często będące nadal aktywne biologicznie, są niemożliwe do inaktywacji. Stale rosnące stężenia środków bakteriobójczych w środowisku powodują często nieodwracalne zmiany, a ich długi okres półtrwania przysparza wielu problemów [Popowska 2017].

Czas degradacji antybiotyków zależy od czynników, takich jak: ich stężenie, stopień złożoności struktury chemicznej, skład gleb, w których się znajdują, pH, temperatury, nasłonecznienia, zdolności sorpcyjnych poszczególnych warstw gleby, dostępności tlenu i innych. Głównymi naturalnymi procesami, w których antybiotyki mogą pełnić rolę substratu są reakcje: fotodegradacji, hydrolizy enzymatycznej (z udziałem bakterii), dekarboksylacji czy hydroksylacji. Warto również zauważyć, iż w niskich temperaturach naturalne procesy degradacyjne są mało efektywne i przykładowo podczas zimy można zauważyć zwiększanie się stężenia zanieczyszczeń leko-pochodnych w glebie. Czasy częściowej degradacji antybiotyków podane zostały w tab. 2.

Tabela 2

Czas degradacji antybiotyków w środowisku [Thiele-Bruhn 2003]

Grupa antybiotyków	Procentowa ilość zdegradowanej dawki początkowej	Czas degradacji
β -laktamy	0 – 50%	1 – 49 dni
Tetracykliny	do 24%	10 – 180 dni
Polietera	do 30%	do 70 dni
Makrolidy	0 – 50%	5 – 30 dni
Aminoglikozydy	Śladowe ilości	do 30 dni
Imidazole	do 50%	14 – 72 dni
Sulfonamidy	0 – 50%	22 – 64 dni
Poli-peptydy	12 – 90%	2 – 173 dni

Niestety większość antybiotyków nie zostaje inaktywowana i zachowują swoje właściwości bakteriobójcze aż do momentu rozpadu ich struktury. Nie pomagają tutaj również oczyszczalnie ścieków, które nie są przystosowane do ich usuwania. W związku z tym leki kumulują się i mogą lokalnie osiągać wysokie stężenia zwłaszcza w warstwach glin, które naturalnie zatrzymują duże ilości wody. Pozwala to na częściowe wydobycie wody z tych ośrodków i odseparowanie jej od leków i ich metabolitów.

Udowodniono laboratoryjnie, że pod wpływem chlorowania roztworu zawierającego antybiotyki, doprowadza się do degradacji takich związków jak trimetoprim oraz β -laktamy. Inne antybiotyki można usuwać z pomocą filtracji węglowej, koagulacji lub jonizacji.

4. ROZWÓJ ANTYBIOTYKOOPORNOŚCI

W świecie mikrobiologicznym występują dwa rodzaje lekooporności – wrodzona oraz nabyta. Pierwsza z nich to cecha gatunkowa konkretnego szczepu bakterii, które w skutek współistnienia z innymi mikroorganizmami zdolnymi do wytwarzania związków bakteriobójczych, uodparniają się na ich działanie. Drugi rodzaj oporności to ta, nabywana przez mikroorganizmy na drodze ewolucji genetycznej bądź wymiany części genomu z innymi, odpornymi już bakteriami.

W roku 1973 stwierdzono, że większymi zdolnościami wytwarzania oporności na leki cechują się bakterie niepatogenne, żyjące w glebie głównie na dużych głębokościach [Benveniste i Bavies 1973]. Po przeprowadzeniu wnikliwych analiz badacze doszli do konkluzji, że oporność mikroorganizmów patogennych jest powodowana przede wszystkim ich przetasowywaniem genetycznym z organizmami

niepatogennymi. Należy jednak pamiętać, iż w latach 70 ubiegłego wieku zanieczyszczenie środowiska lekami nie było jeszcze tak poważne jak dziś, a obecność antybiotyków w środowisku przyrodniczym była naturalnym czynnikiem selekcji i przyczyniała się do genetycznej różnorodności wśród mikroorganizmów. Musiały one rozwijać złożone mechanizmy obronne, takie jak systemy receptorów wykrywających obecność konkretnych cząstek oraz nowe szlaki metaboliczne z wykorzystaniem enzymów zdolnych do rozkładania niebezpiecznych związków. Każde kolejne pokolenie bakterii było coraz lepiej przystosowywane ewolucyjnie do radzenia sobie z niekorzystnymi warunkami środowiska [Popowska 2017].

Wraz z rozwojem antybiotykoterapii coraz większe ilości leków dostawały się do środowiska. Dawki, które obserwuje się w glebach nie są wystarczające, aby zabić znaczą ilość bakterii, ale są wystarczające, aby te rozpoczęły procesy przystosowawcze. Wynikiem tego jest rosnąca lekooporność patogenów, która rozwija się w sposób niekontrolowany.

W dzisiejszych czasach coraz częściej słychać o szpitalnych zakażeniach superbakteriami, nieodpowiadającymi na terapię wieloma antybiotykami naraz. Takie infekcje są bardzo trudne do wyleczenia, a lekarzom w części przypadków pozostaje jedynie leczenie objawowe oraz objęcie konkretnych oddziałów kwarantanną, aby zminimalizować ryzyko roznoszenia się super-patogenów. Przypomina to sytuacje sprzed wieków, w których ludzie umierali na prymitywne z dzisiejszego punktu widzenia choroby, takie jak zapalenie gardła, oskrzeli, nosogardzieli, czy płuc [Gras, Rodriguez-Monaz i Barcelo 2003].

Niestety wraz z rozwojem medycyny, który w ubiegłym stuleciu był niesamowicie gwałtowny, rozpoczął się powolny rozwój bakterii w kierunku nabywania odporności na antybiotyki. Proces ten nadal postępuje i postępować będzie dopóty, dopóki społeczeństwa i rządy całego świata nie zaczną kontrolować ilości i drogi, jaką przebywają leki po zastosowaniu. Inną kwestią jest konieczność zastosowania nowoczesnych technologii w celu znacznej lub nawet całkowitej eliminacji związków leczniczych z wód miejskich i wiejskich.

5. PODEJŚCIE PRAWNE

Zrzuty antybiotyków z różnych źródeł, a w szczególności z przemysłu farmaceutycznego, mogą powodować poważne zagrożenie ekologiczne i dla zdrowia publicznego. Sytuacje te są szczególne, ponieważ nie występuje w nich faza metabolizmu, co prowadzi do wyższych poziomów antybiotyków w ściekach [Larsson 2014, Bielan et al. 2017].

Komisja Europejska przyznała, że "zanieczyszczenie wód i gleb farmaceutykami jest nowym problemem środowiskowym, a także krytycznym problemem dla zdrowia publicznego". Nie istnieją jednak żadne normy regulujące zrzuty antybiotyków z różnych źródeł [Executive Agency for Health and

Consumers, 2013]. Rosnąca świadomość wpływu pozostałości antybiotyków na organizmy wodne doprowadziła do umieszczenia niektórych związków antybiotykowych (erytromycyny, klarytromycyny i azytromycyny) na "Liście obserwacyjnej" Unii Europejskiej (UE), obejmującej nowe zanieczyszczenia wód, na podstawie decyzji wykonawczej Komisji UE 2015/495 [Commission Implementing Decision (EU) 2015/495]. Lista ta została następnie zaktualizowana do drugiej listy obserwacyjnej na podstawie decyzji wykonawczej Komisji (UE) 2018/840 [Commission Implementing Decision (EU) 2018/840], na której znajdują się antybiotyki makrolidowe (erytromycyna, klarytromycyna i azytromycyna) oraz antybiotyki, takie jak amoksycylina i ciprofloksacyna. Dodatkowo na mocy decyzji wykonawczej komisji (UE) 2022/679 z dnia 19 stycznia 2022 r. ustanawiającej listę obserwacyjną substancji i związków wzbudzających zainteresowanie w odniesieniu do wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi zgodnie z dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/2184 do pierwszej listy obserwacyjnej włączono sulfametoksazol oraz trimetoprym [Commission Implementing Decision (EU) 2022/679, Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council]. W konsekwencji powyższych dokumentów legislacyjnych na terenie Unii Europejskiej te antybiotyki muszą być monitorowane na poziomie unijnych standardów jakości.

Na poziomie europejskim, ale także globalnym, w odniesieniu do zanieczyszczenia gleby, wód podziemnych i ścieków, brakuje ścisłych regulacji dotyczących sposobu monitorowania stężenia antybiotyków w środowisku, badania losów środowiskowych tych związków i przekazywania danych z monitoringu (sieć transmisji danych) oraz oceny ryzyka środowiskowego antybiotyków. Ten permisywizm legislacyjny i brak szczegółowych regulacji można częściowo wytłumaczyć brakiem konsensusu w sprawie bezpiecznych stężeń pozostałości antybiotyków w środowisku pod względem rozwoju oporności oraz brakiem jasnych i solidnych dowodów naukowych na temat zanieczyszczenia środowiska pozostałościami leków.

Niestety, w chwili obecnej nie istnieje standardowy protokół eksperymentalny do analizy środowiskowej antybiotyków i produktów ich przemiany (metabolitów lub produktów degradacji). W celu przeprowadzenia spójnej oceny badań w ramach przepisów prawnych, na poziomie międzynarodowym potrzebne są zwalidowane i zharmonizowane metody oraz bardziej realistyczne scenariusze eksperymentalne. Większość badań dotyczących analizy pozostałości antybiotyków wykorzystuje techniki takie jak LC-MS/MS, z tendencją do rozwijania technik wieloanalitowych. Analizy te koncentrują się jednak na wykrywaniu związków macierzystych, natomiast rzadko opisywane są przypadki jednoczesnej analizy produktów przemiany.

W celu zminimalizowania ilości farmaceutyków w środowisku konieczna jest poprawa istniejącego prawodawstwa dotyczącego farmaceutyków, w tym antybiotyków, uznanie farmaceutyków za priorytetowe substancje zanieczyszczające środowisko oraz poprawa dostępności i gromadzenia danych dotyczących

tej grupy zanieczyszczeń. W tym kontekście potrzebne byłyby techniki analityczne pozwalające na wyjaśnienie struktury i identyfikację produktów transformacji.

6. PODSUMOWANIE

Pojawiający się problem występowania pozostałości antybiotyków i oporności na antybiotyki jest zjawiskiem złożonym, które wymaga globalnego podejścia i wysiłków ze strony rządów, odpowiednich organizacji i zainteresowanych stron. Zanieczyszczenie środowiska antybiotykami powinno być zmniejszane, począwszy od uregulowania kwestii konsumpcji antybiotyków, a skończywszy na uregulowaniu kwestii Europejskiej Agencji Leków.

Zwiększone zużycie antybiotyków jest bezpośrednio odpowiedzialne za skażenie środowiska antybiotykami. Precyzyjna polityka dotycząca stosowania i utylizacji antybiotyków jest absolutnie konieczna, ponieważ niewłaściwe ich stosowanie zagraża równowadze ekosystemów i zdrowiu ludzi. Dlatego też, aby ograniczyć i kontrolować stosowanie antybiotyków i ich odprowadzanie do środowiska muszą zostać wprowadzone odpowiednie środki prawne. Społeczność naukowa proponuje również wprowadzenie wartości granicznych dla stężeń antybiotyków w środowisku jako środka ochronnego dla środowiska i zdrowia ludzi.

Nie można ignorować korzyści i potrzeby stosowania antybiotyków, ale należy pamiętać o ich obecności w środowisku, biorąc pod uwagę potencjał tychże substancji do utrzymywania, wywoływania i rozpowszechniania oporności, a także wywierania szeregu negatywnych skutków na cały ekosystem. Aby poszerzyć wiedzę na temat wpływu pozostałości antybiotyków na środowisko, należy w odpowiednim czasie podjąć działania ochronne, które pozwolą uniknąć nieodwracalnych skutków.

LITERATURA

1. Baus T., Michalska A. , „*Obecność farmaceutyków w środowisku wodnym na przykładzie antybiotyków i ich wpływ na ekosystemy*”, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 22 (1), 2018, s. 89-99.
2. Benveniste R. Davies J. „*Aminoglycoside antibiotic-inactivating anzymes in actinomycetes similar to those present in clinical isolates of antibiotic-resistant bacteria*”, Proc. Natl. Acad. Sci., USA 70, 1973, s. 2276-2280.
3. Bielan A., Šimatovič A., Kosič-Vukšić J., Senata I., Ahel M., Babić S., et al., 2017, Negative environmental impacts of antibiotic – contaminated effluents from pharmaceutical industries. Water Research, nr 126, s. 79-87.

4. Boroń M., Pawlas K., „*Farmaceutyki w środowisku wodnym – przegląd literatury*” *Problemy Higieny i Epidemiologii*, 96 (2), 2015, s. 357-363.
5. Commission Implementing Decision (EU) 2015/495 of 20 March 2015 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council.
6. Commission Implementing Decision (EU) 2018/840 of 5 June 2018 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Implementing Decision (EU) 2015/495.
7. Commission Implementing Decision (EU) 2022/679 of 19 January 2022 establishing a watch list of substances and compounds of concern for water intended for human consumption as provided for in Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council.
8. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption.
9. Executive Agency for Health and Consumers, 2013, Study on the environmental risks of medicinal products. Final Report. [https://ec.europa.eu › files › study_environment_0](https://ec.europa.eu/files/study_environment_0) (dostęp 24.05.2022).
10. Gros M., Rodriguez-Mozaz S., Damia Barcelo, „*Rapis analisis of multiclass antibiotic residues and some of their metabolites in hospital, urban wastewater and river water by ultra-high-performance liquid chromatography coupled to quadrupole-linear ion trap tandem mass spectrometry*”, *Journal of Chromatography A* 1292, 2013, s. 173 – 188.
11. Kholhring Lalchhandama, „*Reappraising Fleming’s snot and mould*”, „*Science Vision*”, 20 (1), 2020, s. 29–42.
12. Larsson D.J.G., 2014, „*Pollution from drug manufacturing: review and perspectives*”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, nr 369, s. 20130571.
13. Lathers C. M., J. „*Role of veterinary medicine on public health: antibiotic use in food animals and humans and the effect on evolution of antibacterial resistance*”, *J.Clin. Pharmacol*, 41, 2001, s. 595-599.
14. Popowska M., „*Kosmos, Problemy Nauk Biologicznych*”, „*Polskie Towarzystwo Przyrodników im. Kopernika*, 66 (1), 2017, s. 81–91.
15. Preeti Chaturvedi, Balendu Shekher Giri, Parul Shakla, Pratina Gupta „*Recent advancement in remediation of synthetic organic antibiotics from environmental matrices: Challenges and perspective*” *Bioresource Technology*, 319, 2021.
16. Sanderson H., David J. Johnson, Tamara Reitsma, Richard A. Brain, Christian J. Wilson, Keith R. Solomon, „*Ranking and prioritization of environmental risks of pharmaceuticals in surface waters*”, *Science Direct, Regulatory Toxicology and Pharmacology* 39, 2004, s. 158 – 183.

17. Svetlana Iuliana Polianciuc, Anca Elena Gurzau, Bela Kiss, Maria Georgia Stefan, Felicia Loghin, „*Antybiotyky in the enviroment: causes and consequences*”, *Medicine and pharmacy reports*, 93 (3), 2020, s. 231 – 240.
18. Thiele-Bruhn S., „*Pharmaceutical antibiotic composition and function in sewage treatment systems*”, *Current Option in Biotechnology*, 13, 2002, s. 218-227.

ACKNOWLEDGEMENTS

Badanie zostało sfinansowane przez Ministerstwo Edukacji i Nauki: grant 0911/SBAD/2204.

SOURCES AND CONSEQUENCES OF THE PRESENCE OF THE ANTIBIOTICS IN THE ENVIROMENT

Abstract:

The presence of antibiotics in the environment is related to their chemical and pharmacokinetic properties. These compounds can change in ecosystems and lead to bacterial mutations causing their antibiotic resistance. An important support for the regulation of the presence of antibiotics in the environment is the elucidation of the causal relationship between their presence and their effects on the ecosystem. Therefore, the accurate detection and quantification of environmental antibiotics and compounds with potential biological activity would be an important step in building the scientific base. Results obtained available studies emphasize the need to monitor and understand the fate of antibiotics in the environment.

Keywords: antibiotics, antibiotics resistance

Michael ZGUROVSKY*

ENSURING ENERGY INDEPENDENCE AS A NEW GLOBAL CHALLENGE FOR EUROPEAN SECURITY

The article presents an analysis of the problems of energy independence and energy supply of European countries given the impact of Russia's full-scale military invasion of Ukraine. This analysis is based on the Energy Freedom Index (Ief) developed by the authors, which aggregates sub-indices of energy potential, energy balance, and energy development. A rating of 142 countries of the world was formed according to the value of this index and the places of the EU countries and Ukraine in this rating were determined. Measures aimed at increasing the level of energy independence of European countries and Ukraine were analyzed. As the main measures were proposed diversification of supplies and accelerated transition to clean energy. European countries have been clustered according to the level of economic and security losses due to the embargo on Russian energy resources. Four groups of countries have been identified in terms of their readiness to replace Russian energy resources and impose embargoes. The dynamics of the indicators of the energy freedom index, and their dependence on Russian imports were analyzed and measures to reduce this dependence were proposed

Keywords: energy independence, energy freedom index, full-scale Russian invasion of Ukraine, reliance on Russian fossil fuels.

1. INTRODUCTION

The country's energy independence is a fundamental component of its sovereignty. It determines the self-sufficiency of the state in terms of energy resources, energy supply, and energy generation. In a narrower sense, energy independence determines the independence of one country from the energy resources of another and demonstrates the extent to which the economy relies on its imports to meet its energy needs. The European Union imports 90% of its gas consumption. Until recently, the share of the Russian Federation in these imports was 45%. (Fig. 1). This is about 140 billion cubic meters of natural gas, of which 15 billion cubic meters were supplied in liquefied form.

* Kyiv Polytechnic Institute, National Technical University of Ukraine

Russia also accounted for about 25% of oil and oil products imports and 45% of coal imports [1].

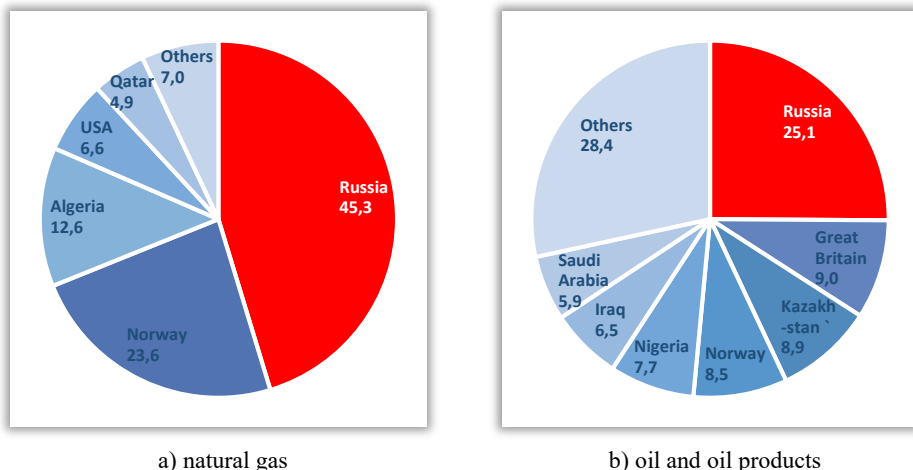


Fig. 1. Structure of imports of major energy sources in the European Union (%), 2021 [1]

In 2021, the European Commission developed a program of gradual abandonment of Russian gas imports “Fit for 55”. It presented a set of legislative proposals and initiatives to ensure that EU policies are in line with climate goals, but was rather slow, with a deadline of 2050.

The full-scale Russian invasion of Ukraine on February 24, 2024, exacerbated the problems in the energy market and necessitated an immediate review of the energy independence of the EU. This article examines the prerequisites for building such strategies and explores the possibilities of developing energy systems in Europe, given the significant reduction in dependence on Russian fossil fuels.

2. ENERGY INDEPENDENCE OF EUROPEAN COUNTRIES: PREREQUISITES AND PROSPECTS

2.1. Measures of the European Union to eliminate dependence on Russian fossil fuels

This situation shows that the countries of the European Union have been implementing the strategy of energy independence too slowly, probably because they saw an economic advantage in the use of imported Russian fuel resources. For each country, the ability to abandon Russian fossil fuels is determined by their energy systems' structure and state of development.

In the paper [2] we proposed a method of a quantitative assessment of the state of energy systems of countries in the form of an integrated index Energy Freedom Index (Ief), which summarizes the characteristics of these systems by the following groups of indicators (subindices):

1. Subindex of energy potential (Iep) – determines the established potential of the country in terms of access to fuel and energy resources, namely to reserves of coal, natural gas and crude oil;

2. Subindex of energy balance (Ieb) – reflects the annual balance between total production and consumption of electricity and heat in the country;

3. Subindex of energy development (Ied) – demonstrates the ability of the country's energy system to develop, increase energy efficiency and increase the capacity of electricity generation facilities, including from renewable sources.

The integrated Energy Freedom Index is defined as the product of three subindexes (Table 1):

$$Ief = Iep \times Ieb \times Ied$$

Table 2 shows the values of the Energy Freedom Index and its components for the EU and Ukraine (Ief values for 142 countries are given in [2]). The table also contains data on the share of energy imports from Russia in the structure of national consumption.

In 2020, there have been significant changes in the EU economy and the electricity market in particular. Electricity consumption and imports decreased significantly, and fossil fuel use decreased accordingly. This was due to the slowdown in economic development due to the coronavirus pandemic and favorable weather conditions. The development of renewable generation (+80 TWh) and the increase in net imports (+13 TWh), mainly from Norwegian hydropower plants, also had a partial impact. In general, the carbon potential of the EU electricity in 2020 decreased by 14% compared to 2019 [3; 4].

Table 1. Characteristics of the components of the Energy Freedom Index (*Ief*)

Subindex	Characteristic	Calculation	Condition and meaning
1. Subindex of energy potential (<i>Iep</i>)	Determines the established potential of the country in terms of access to fuel and energy resources: coal, natural gas and crude oil reserves	The value of the total indicator of the overall explored reserves of coal, natural gas and crude oil, determined per capita. To determine the total indicator and reconcile the data, which differ both in units of measurement and in the range of values there was used a logistic normalization of data according to the formula: $C_{\text{norm}}(x_{ij}) = \left(1 + e^{\frac{a-x_{ij}}{b}}\right)^{-1} + 0.5,$ here parameters a and b are calculated as the mean and standard deviation of the sample of countries under analysis	Larger sub-index values within the range [0,1; 1,5] – greater potential. Average value is 1,0
2. Subindex of energy balance (<i>Ieb</i>)	Reflects the annual balance between total production and consumption of electricity and heat in the country	Ratio of annual production and annual energy consumption (both indicators – in million metric tons of oil equivalent). The volume of energy production includes: production and processing of coal, crude oil and leasing condensate, natural gas; electricity generation at nuclear and hydroelectric power plants; geothermal electricity generation; production of solar thermal and photovoltaic electricity and wind electricity; production of fuel from wood and biomass waste	Subindex value $\geq 1,0$ – positive energy balance, the ability to meet the energy needs of the country's own production. Subindex value $<1,0$ – negative energy balance
3. Subindex of energy development (<i>Ied</i>)	Demonstrates the ability of the country's energy system to develop with the possibility of energy transition	Chain growth rate of the total installed capacity of all electricity generation facilities in the country. The total installed capacity of all electricity generation facilities consists of: power of fossil fuel electricity; hydraulic accumulators; hydroelectric power plants; nuclear electricity; geothermal electricity; electricity from biomass and waste; total electricity from renewable sources without taking into account hydropower. The value of the current year's subindex is defined as a percentage of the value of the indicator for the previous year	The value of the subindex of the base year 2000 = 1,0. Subindex value $\geq 1,0$ – positive dynamics of development. Subindex value $<1,0$ – negative dynamics of the decline

Table 2. Ranking of the EU and Ukraine by the value of the Energy Freedom Index and the relationship between the index and the share of energy imports from Russia in the structure of their national consumption [2; 3]

Place in the EU ranking 2020	Country	Ief 2019	Ief 2020	Index components 2020			Share of imports from Russia in national consumption	Correlation between Ief and the share of imports from Russia
				Subindex of energy potential	Subindex of energy balance	Subindex of energy development		
1	Ukraine	0,70	,77	1,07	0,72	1,00	NA	NA
2	Bulgaria	0,59	,76	1,00	0,69	1,11	0,40	0,20
3	Poland	0,58	,63	1,05	0,59	1,01	0,37	-0,85
4	Denmark	0,70	0,61	0,95	0,98	0,65	0,16	-0,65
5	Czech Republic	0,55	,59	1,00	0,63	0,94	0,24	-0,43
6	Sweden	0,68	0,59	0,94	0,63	1,00	0,08	0,57
7	Latvia	0,18	0,56	0,94	0,64	0,93	0,31	-0,29
8	Slovenia	0,47	0,55	0,97	0,55	1,03	0,10	0,10
9	France	0,48	0,54	0,94	0,58	0,99	0,09	-0,10
10	Romania	0,72	0,54	0,95	0,72	0,78	0,18	-0,58
11	Finland	0,42	0,49	0,94	0,52	1,00	0,45	0,09
12	Croatia	0,36	0,43	0,95	0,45	1,00	0,09	-0,08
13	Hungary	0,35	0,42	0,99	0,40	1,05	0,54	-0,28
14	Slovakia	0,32	0,40	0,95	0,41	1,03	0,60	-0,28
15	Germany	0,33	0,37	1,01	0,37	0,98	0,28	-0,65
16	Austria	0,35	0,32	0,94	0,42	0,82	0,03	0,10
17	Netherlands	0,39	0,32	0,95	0,35	0,95	0,55	-0,58
18	Portugal	0,23	0,31	0,94	0,35	0,94	0,05	0,49
19	Ireland	0,31	0,28	0,94	0,26	1,14	0,53	0,94
20	Greece	0,25	0,28	0,99	0,32	0,90	0,03	0,30
21	Spain	0,26	0,28	0,95	0,28	1,04	0,08	-0,39
22	Belgium	0,22	0,26	0,94	0,26	1,06	0,29	0,25
23	Italy	0,21	0,24	0,94	0,25	1,00	0,25	0,53
24	Lithuania	0,10	0,13	0,94	0,13	1,10	0,98	0,13
25	Estonia	0,18	0,10	0,94	0,11	1,01	0,16	-0,79
26	Luxembourg	0,03	0,05	0,94	0,05	1,00	0,03	0,36
27	Cyprus	0,04	0,05	0,94	0,05	1,03	0,05	-0,41
28	Malta	0,01	0,01	0,94	0,01	1,00	0,17	0,03

The Energy Freedom Index of the leaders of the European rating last year decreased – in Romania by 25%, in Denmark and Sweden – by 13%. Instead, for countries that have reduced fossil fuel consumption in 2020 – France, Germany, Belgium, Italy, and others – Ief has grown. The reduction in fossil fuel consumption and demand has also led to lower prices for all types of primary energy resources. Prices for coal, natural gas, and oil have been the lowest in twenty years, falling to 2000 levels.

In 2021, the EU was hit by an energy crisis. On the one hand, the post-pandemic economic recovery has increased natural gas consumption – in the EU as a whole by 4% compared to 2020. In particular, Slovakia increased gas consumption by 25%, Estonia – by 17%, Spain – by 13%, Italy – by 8%, France – by 3%, Germany – by 5% (Fig. 2, a). Only some countries have managed to reduce natural gas consumption. In particular, the Netherlands reduced gas consumption by 13%, Sweden – by 31%, Finland – by 23%, Lithuania – by 18% (Fig. 2, b).

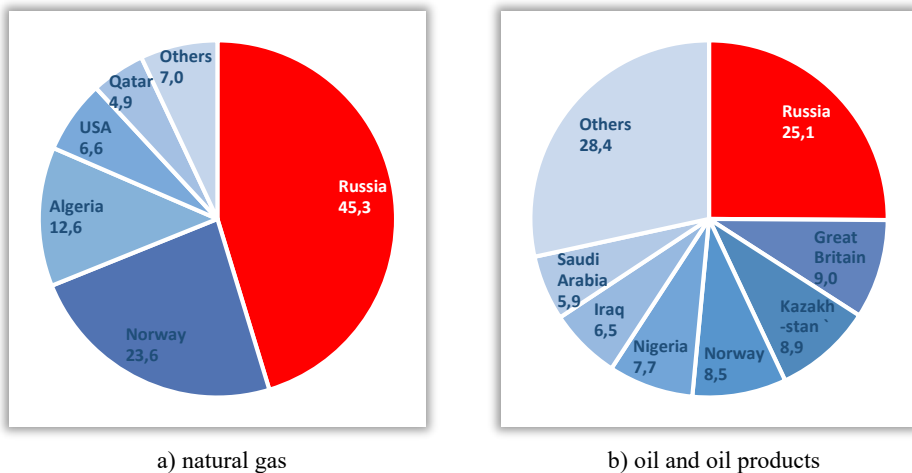
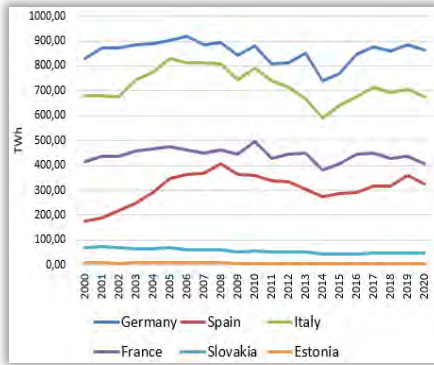


Fig. 1. Structure of imports of major energy sources in the European Union (%), 2021 [1]

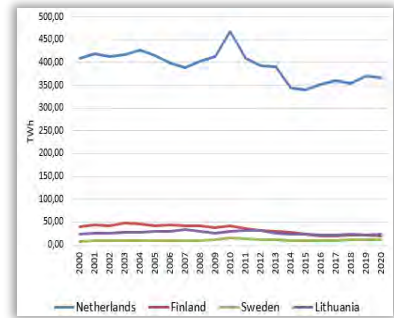
In 2021, the European Commission developed a program of gradual abandonment of Russian gas imports “Fit for 55”. It presented a set of legislative proposals and initiatives to ensure that EU policies are in line with climate goals, but was rather slow, with a deadline of 2050.

The full-scale Russian invasion of Ukraine on February 24, 2024, exacerbated the problems in the energy market and necessitated an immediate review of the energy independence of the EU. This article examines the prerequisites for building such

strategies and explores the possibilities of developing energy systems in Europe, given the significant reduction in dependence on Russian fossil fuels.



b) EU countries that have increased consumption by the beginning of 2021

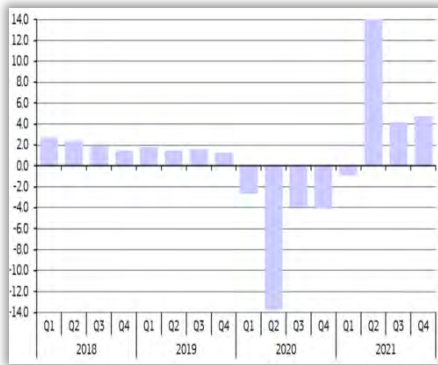


a) EU countries that have reduced consumption by the beginning of 2021

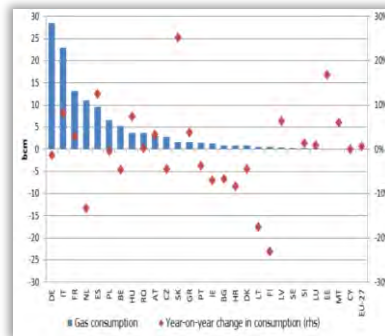
Fig. 2. EU natural gas consumption, 2000-2021 [7]

On the other hand, the EU's own natural gas production decreased even more - by 13% compared to 2020. Quarterly production became lower than in the period 2015-2019 [6]. This showed that the reduction in domestic gas production in the EU is a long-term trend (Fig. 3).

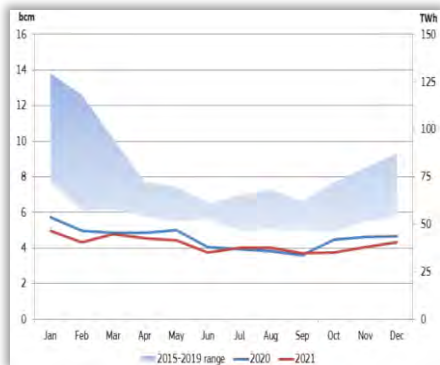
The full-scale Russian invasion of Ukraine at the end of February 2022 significantly affected the situation in the European energy market. Prices have risen unprecedentedly and consumption has fallen (Fig. 4). According to forecast data, in 2022 the demand for natural gas is expected to decrease by about 6%, which will correspond to the level of 2020 [8].



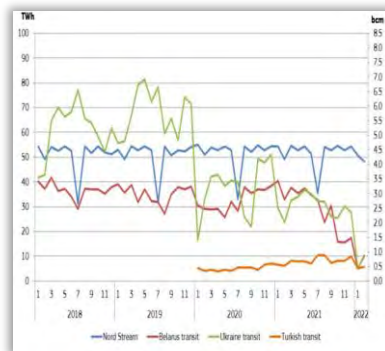
a) GDP change, year-on-year comparison (%)



b) gas consumption in the fourth quarter of 2021, year-on-year change

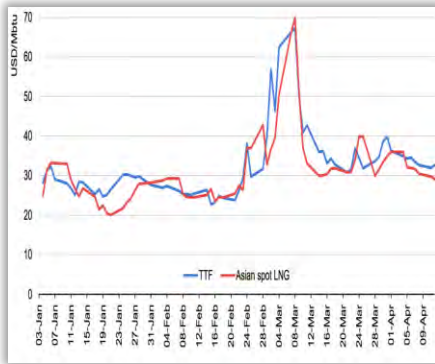


c) monthly gas production EU

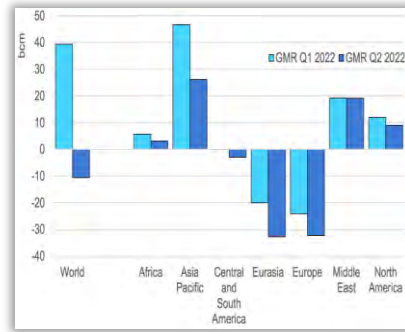


d) monthly imports of natural gas from Russia by supply route

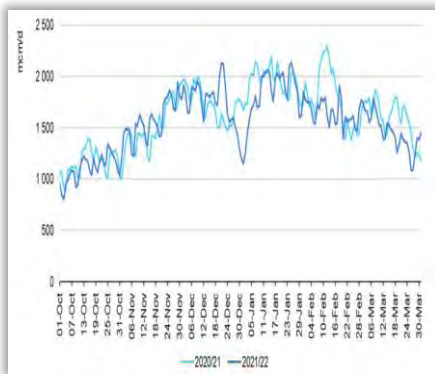
Fig. 3. EU energy market indicators, 2015-2021 [6]



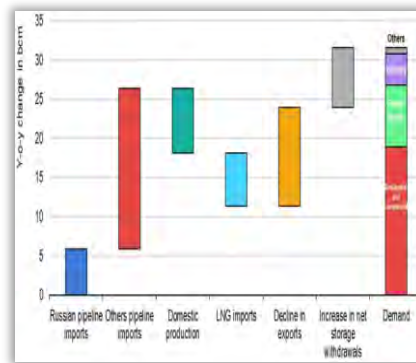
a) daily European month-ahead and Asian spot LNG prices



b) natural gas consumption growth in the two latest issues of the Gas Market Report



c) daily natural gas demand



d) natural gas balance, year-on-year change

Fig. 4. EU energy market indicators, 2022 [8]

Energy prices, which began to rise in 2021, jumped sharply – as of March 2022 by an average of 40% compared to December 2021 (Fig. 5).

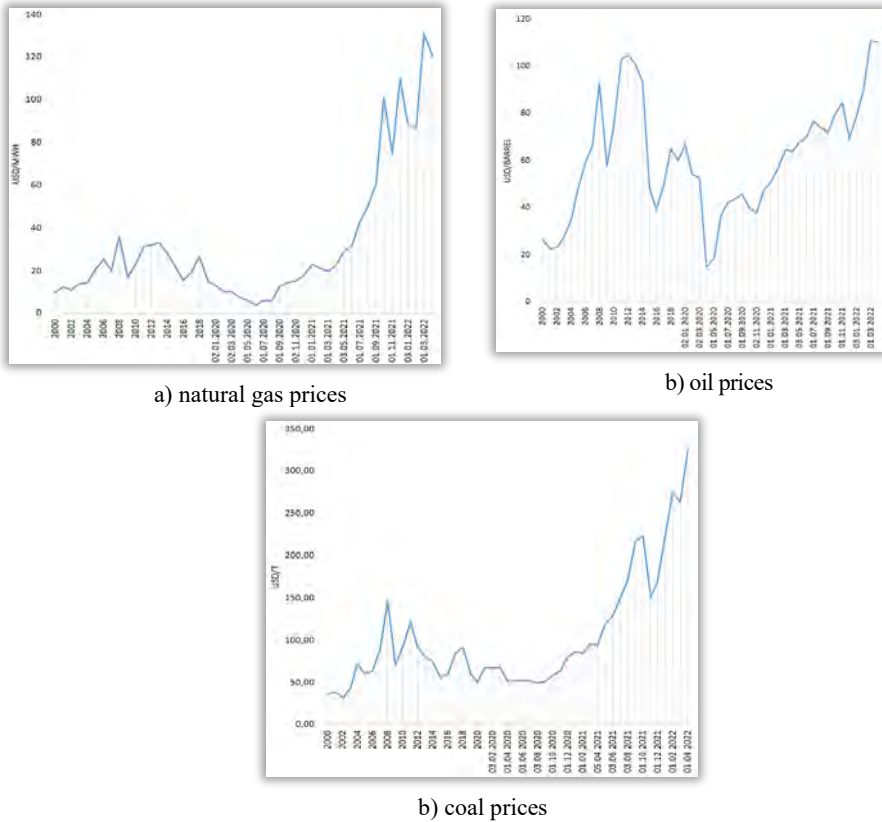


Fig. 5. Coal, natural gas, oil prices, 2000-2022 [9; 10; 11]

In early March 2022, the price of natural gas in Europe set a new high and exceeded USD 3 800 per thousand cubic meters. As a result, the European Commission has presented a preliminary plan to eliminate dependence on Russian fossil fuels by 2030 REPowerEU [12].

2.2. Measures of the European Union to eliminate reliance on Russian fossil fuels

The dynamics of the energy independence index of countries such as Hungary, Germany, Slovakia, Ireland, Spain, etc., indicates the presence of energy potential, but their energy balance is low and energy development is slow. Lack of activities to increase energy independence, post-pandemic economic recovery and growing dependence on imported fuels have led to an energy crisis in these countries. Countries that had a high index, on the other hand, have greater opportunities to reduce their dependence on Russian fossil fuels.

According to the plan, by the end of 2022 it is expected to reduce EU demand for Russian gas by 100 billion cubic meters or two-thirds of the total. The strategy provides the implementation of two main directions [12]:

The first direction is to diversify supplies and attract more renewable gas sources. In particular, it is planned to increase LNG imports (compensating for 60 billion cubic meters of gas), double sustainable biomethane production (compensating for 18 billion cubic meters of gas), increase production and imports of renewable hydrogen (20 million tons of hydrogen can compensate for 50 billion cubic meters of gas).

The second direction is to accelerate the transition to clean energy. In particular, it is planned to install photovoltaic panels on the roofs of residential buildings and enterprises, to double the speed of installing heat pumps. The commission also outlined measures to respond to rising energy prices in Europe and replenish gas supplies next winter. By the end of this year, about 25% of electricity can be generated by solar energy. In general, by the end of 2022 it is expected to reduce EU demand for Russian gas by 100 billion cubic meters or two-thirds of the total volume.

According to the REPowerEU plan, the European Commission has launched technical support for 17 EU member states to phase out Russian fossil fuels. The technical package of recommendations will allow states (Belgium, Bulgaria, Czech Republic, Estonia, Ireland, Greece, Spain, Croatia, Italy, Cyprus, Hungary, Poland, Portugal, Romania, Slovenia, Slovakia and Finland) to identify and implement political reforms and investments in such areas as diversifying energy supplies, accelerating the transition to renewable energy sources and improving energy efficiency [12].

A more detailed plan “A 10-Point Plan to Reduce the European Union’s Reliance on Russian Natural Gas” was presented in March 2022 by the International Energy Agency [13]. In order to ensure security and protect the EU from possible changes in energy supply, the European Parliament has also adopted regulations on measures to ensure security of gas supply (№2017/1938) and on conditions for access to natural gas transmission networks (№715/2009) [14].

In support of Ukraine and opposition to Russian armed aggression, the leaders of the European Union held an informal meeting in Versailles on March 10-11, 2022. The Versailles Declaration was signed as a result of the meeting. It also agreed to stop the import of Russian gas, oil and coal as soon as possible [15].

In general, the updated energy supply strategy of the EU countries envisaged by the above-mentioned acts is based on two main directions: diversification of supplies and accelerated transition to clean energy.

In the context of the second direction, the act of "green" taxonomy of the European Union was adopted, which sets out a number of provisions for changing the structure of energy supply. In particular, the most effective way to decarbonize the economy is direct electrification of end use. 66% of European electricity has already been decarbonized, of which 50% – due to nuclear energy [16]. Increasing the use of nuclear energy by EU countries is impossible. The planned construction of 14 new nuclear reactors in Europe, in particular in France, is not enough to prevent a gradual decline in the total installed capacity of existing reactors, which are nearing the end of their technical life. The new reactors will keep the share of nuclear energy in the structure of total energy production at 50% in 2035-2050.

Taking into account the climatic characteristics of the European region it is also impossible to use renewable energy for a full maximum. However, as an additional source, it is planned to increase the use of biomass, wind or solar energy from 32% to 40% of final energy consumption by 2030.

Thus, the main direction of increasing the level of energy independence of European countries from Russia is the diversification of gas supplies. With technical support from the EU, European countries are already taking steps to reduce or stop gas and oil imports from Russia, but most of the measures are planned for five years, as their rapid implementation is problematic. There are geographical difficulties in transporting LNG. Given the different volumes of Russian gas consumption and the different capacity of LNG infrastructure, countries have different options for its replacement, as shown in (Fig. 6, 7).

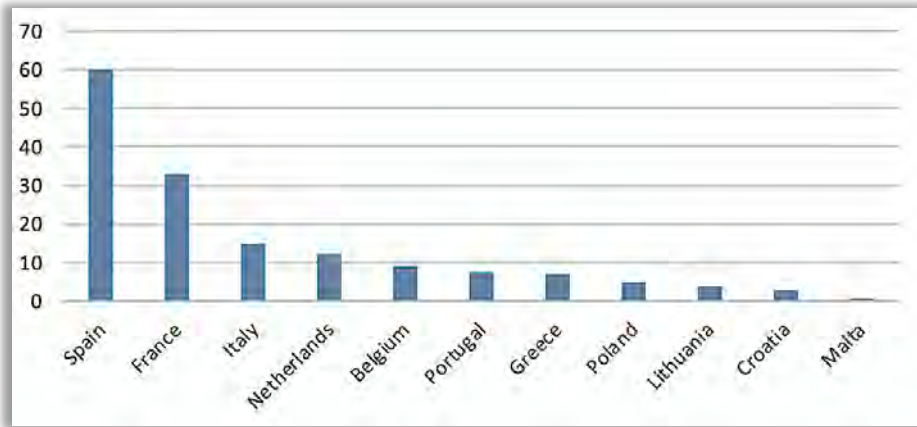


Fig. 6. Annual capacity of liquefied natural gas terminals (billion cubic meters per year), 2022 [17]

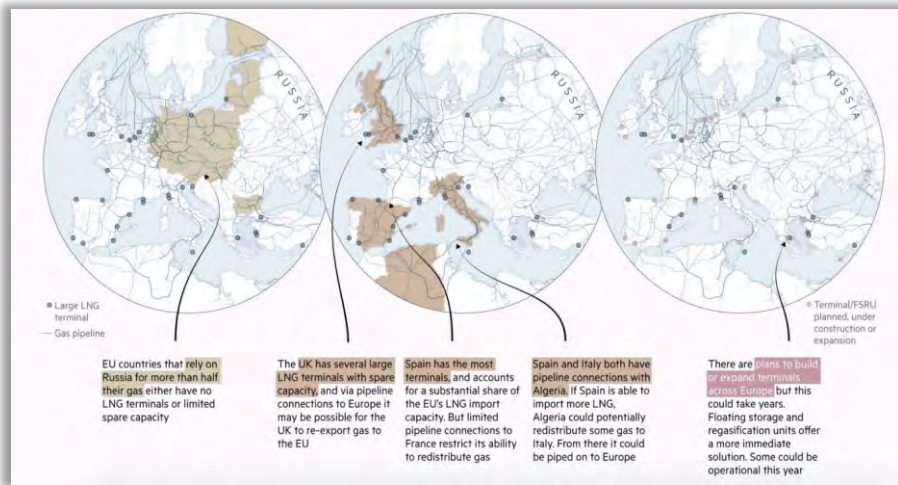


Fig. 7. Prospects for increasing LNG imports to EU countries [18]

The Baltic states were the first countries in Europe to completely stop importing Russian gas. From April 1, 2022, Russian natural gas will no longer flow to Latvia, Estonia

and Lithuania. By the end of 2022, the Netherlands plans to abandon Russian oil, gas and coal.

The most difficult thing is to refuse to import Russian gas to its largest consumers - Germany, Italy and France. However, France has said it is ready to support an embargo on Russian oil and gas imports. Other countries, including Germany, are not ready to give up supplies from Russia. In case of a full embargo on imports from Russia, Germany will be able to replace only 20% of gas consumed by increasing coal combustion. At the same time, the German government has assured that it will not allow the Nord Stream 2 gas pipeline to start operating. Austria, which is 80% dependent on Russian natural gas, cannot abandon Russian natural gas in the nearest future, but the country has completely abandoned Russian oil [19].

Europe's efforts to gradually reduce gas imports from Russia are expanding the geography of supply. Already this year, the EU plans to increase liquefied gas supplies from the United States and Qatar by 50 billion cubic meters. The EU relies on Caspian producers to supply natural gas, which can supply up to 10 billion cubic meters for several months. This requires enhanced cooperation with Turkey, which is becoming a central link in alternative supply routes from Azerbaijan, Turkmenistan and Israel [20; 21]. Europe is focusing on the development of nuclear energy capacity, the generation of energy from renewable sources. New oil suppliers are being sought.

As of the end of April 2022, the EU's fifth package of sanctions has decided to impose an embargo only on Russian coal, which will take effect only in August. The European Union is currently developing the sixth package of sanctions that could affect oil and gas exports. However, some countries, such as Hungary and Slovakia, are unprepared for a total ban on Russian oil because it threatens their energy security. They will be given the time until the end of 2023 to enforce sanctions, one year more than other EU member states. In order to impose an oil embargo, the consent of the world's largest exporters is required. The UAE, Saudi Arabia, Iran, Venezuela, and others should increase oil production by a total of 10 million barrels per day. At the moment, there is the consent of some countries, but the full consent of all exporters is not yet. Therefore, the European Union admits that it will not be able to agree on the positions of all countries on the oil embargo.

2.3. Losses of European countries from the embargo on Russian energy resources and measures to reduce them

Russia's energy resources have become an important geopolitical factor. According to the Bruegel think tank, the EU pays 450 million and 400 million euros a day for oil

and natural gas imports, respectively. This amount is equivalent to the estimated cost of 160 Caliber cruise missiles launched in Ukraine. In just two months of war, the EU has paid Russia more than 40 billion euros for oil and gas. This money has largely offset the impact of Western sanctions on Russia. The oil and gas sector brings in up to half of its budget revenues and more than half of its exports, and it sells 70% of its gas and 60% of its oil and petroleum products to Europe. In 2021, revenues from oil and gas exports in the federal budget of Russia amounted to 38,1% of total revenues, and profits – 119 billion dollars [22].

In response to the imposition of sanctions by European countries, on March 31, 2022, the President of Russia signed a decree defining new rules for the sale of natural gas to “unfriendly countries” from April 1. Countries-buyers should open special accounts with Gazprombank. The bank will accept payments in foreign currency and will convert it into rubles. Most EU and G7 countries have rejected this requirement, but about 10 countries, including Hungary and Italy, have already opened such accounts [23]. Due to the refusal to demand payment in rubles, Russia has already cut off gas supplies to Bulgaria and Poland. These countries have stated their readiness to stop Russian gas supplies and receive gas through alternative routes from Greece and Germany. But if a similar situation occurs with other, more vulnerable countries, it will require a partial revision of their energy strategy and structure.

All EU countries are taking active measures to replace Russian fuel with energy from other sources. However, as shown above, the level of their readiness and the time of replacement are different and are determined by the level of dependence, policies, and capabilities of countries. Different countries will have different consequences of the embargo on Russian fossil fuels, measured by losses in the country's economy and security.

For further research, a pairwise correlation analysis was conducted to determine the relationship between the Energy Freedom Index, which is a generalized measure of the country's ability to embargo, and the share of Russian energy imports in its total consumption, which is a measure of dependence on Russia (Fig. 8).

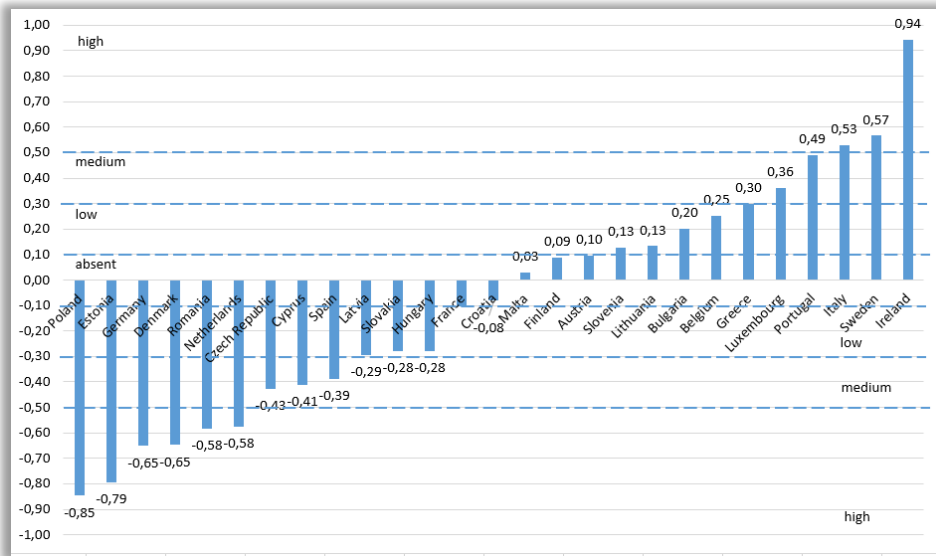


Fig. 8. Correlation coefficient and density of the relationship between the Energy Freedom Index (Ief) and the share of imports of Russian energy resources in the structure of their total consumption (Imrf) for the UE countries

The correlation coefficient is interpreted as follows:

1. Positive coefficient:

- the growth of the Energy Freedom Index is associated with the growth of energy imports from Russia;
- the decrease in the Energy Freedom Index is associated with a decrease in energy imports from Russia;

2. Negative coefficient:

- the growth of the Energy Freedom Index is associated with a decrease in energy imports from Russia;
- the decrease in the Energy Freedom Index is associated with the growth of energy imports from Russia.

The density of the relationship between variables in the interval $[0; \pm 0,1)$ – absent, in the interval $[\pm 0,1; \pm 0,3)$ – low, in the interval $[\pm 0,3; \pm 0,5)$ – medium, and in the interval $[\pm 0,5; \pm 1]$ – high.

Based on the results of the analysis, it is possible to group countries on the basis of the relationship between their energy freedom and the share of Russian energy imports as:

- countries with a high and medium density of the inverse relationship between their energy freedom and the share of imports of Russian energy (Poland, Estonia, Germany, Denmark, Romania, the Netherlands, the Czech Republic, Cyprus and Spain);
- countries with a low level of direct and inverse relationship between their energy freedom and the share of imports of Russian energy (Latvia, Slovakia, Hungary, Slovenia, Austria, Belgium, Lithuania);
- countries for which the relationship between their energy freedom and the share of imports of Russian energy has not been established (Croatia, France, Malta, Finland);
- countries with a high and medium density of direct relationship between their energy freedom and the share of imports of Russian energy (Greece, Luxembourg, Portugal, Italy, Sweden and Ireland).

Among the established groups of countries, only the first can show that for these countries, increasing dependence on energy imports from Russia may reduce the level of their energy independence and vice versa. The rest of the groups have either a weak and no correlation between variables, or results that contradict the hypothesis about the nature of the relationship between the energy freedom of countries and energy imports from Russia.

Thus, the correlation analysis does not allow to clearly identify patterns of dependence of countries on energy imports from Russia and to determine which of them are willing to abandon such imports and take measures to reduce this dependence.

Another approach to grouping countries takes into account the risk of refusing to import energy resources. The grouping of countries in the two-dimensional field of parameters – Energy Freedom Index (Ief) and the share of imports of Russian energy resources in the structure of total consumption (Imrf) – provided an opportunity to distribute countries according to the level of risk. According to the results of grouping for 2020 data (Fig. 9):

- in the high-risk zone (HR) were countries whose index is below average, and which have more than half of Russian energy resources in the structure of total consumption: $I_{ef} < 0.50$, $I_{mrf} > 0.50$ (Greece, Lithuania, Netherlands, Slovakia, Hungary);

- in the medium-risk zone (MR) were countries whose index is below average, but which have less than half of Russian energy resources in the structure of total consumption: $I_{ef} < 0.50$, $I_{mrf} < 0.50$ (Austria, Belgium, Estonia, Ireland, Spain, Italy, Cyprus, Luxembourg, Malta, Germany, Portugal, Croatia);

- in the low-risk zone (LR) were countries whose index is above average, and which have less than half of Russian energy resources in the structure of total consumption: $I_{ef} > 0.50$; $I_{mrf} < 0.50$ (Bulgaria, Denmark, Latvia, Poland, Romania, Slovenia, France, Czech Republic, Sweden).

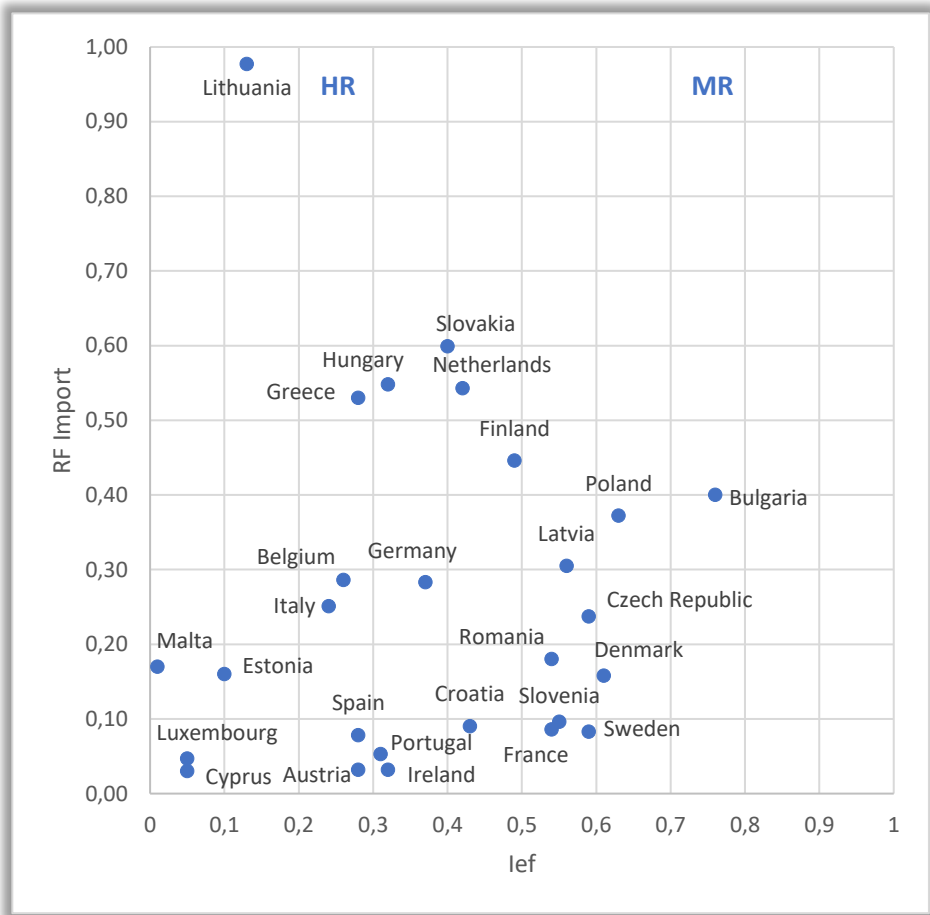


Fig. 9. The grouping of countries in the two-dimensional field of parameters – Energy Freedom Index (Ief) and the share of imports of Russian energy resources in the structure of total consumption (Imrf)

Both of the abovementioned approaches to grouping do not take into account the measures taken by the countries to reduce dependence on energy imports from Russia (which in this case oppose risky measures), so they cannot be used to measure final risk and determine their readiness for the embargo. In addition, the country's readiness to implement the proposed EU embargo is largely determined by its political interests. To this end, the countries were analyzed in the context of a set of measures they took to eliminate Russian dependence and preparedness for the embargo.

To date (since the countries are in the process of making final decisions), four groups of countries can be identified (Table 3) according to the degree of their readiness to replace Russian energy sources and impose an embargo:

- Group 1 – countries for which the refusal to import fuel resources from Russia threatens the greatest losses in the economy, and which need and may receive a delay in the imposition of embargoes (Hungary, Czech Republic, Slovakia and Bulgaria);
- Group 2 – countries that are heavily dependent on fuel imports from Russia, and at the beginning of the sixth package of sanctions have some controversy over the imposition of the embargo (Netherlands, Austria, Germany, Romania, France);
- Group 3 – countries that have significant or moderate dependence on imports of fuel imports from Russia, but support the embargo (Lithuania, Belgium, Italy, Finland, Poland);
- Group 4 – countries that have low dependence on fuel imports from Russia and support the embargo (Greece, Estonia, Ireland, Spain, Cyprus, Luxembourg, Malta, Portugal, Slovenia, Denmark, Latvia).

Measures envisaged by the strategy of elimination of EU dependence taken by certain countries (anti-risk measures) can be divided into four categories: diversification; use of clean energy; reduction of energy consumption; the increase of own energy production and (or) construction of own LNG terminals.

Group 1 – Bulgaria (LR), Czech Republic (LR), Slovakia (HR), Hungary (HR). This group of countries includes both high-risk and low-risk countries, which have low or not very high dependence on Russian energy imports. As can be seen from Table 3, all countries in this group have already increased their energy independence index in 2020 and reduced the share of Russian fuel imports. The analysis showed that for the countries of this group, the primary measure to reduce dependence is the diversification of fuel suppliers.

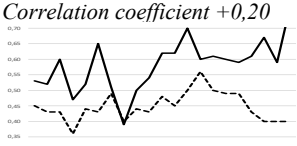
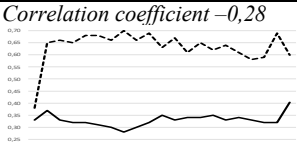
Bulgaria has the highest index and declining dynamics of imports from Russia, which is already taking measures to diversify – liquefied gas supplies from the US at lower prices than from Russia, supplies from Azerbaijan, and in the long run - LNG use through terminals in Greece and Turkey [24]. The Czech Republic, with fairly strong reserves of coal, oil and gas, is mainly focused on imports from Russia. The lack of differentiation policy in the past determines the urgent need for its implementation. In particular, the Czech company Mero acquired a stake in Shell's TAL oil pipeline [25].

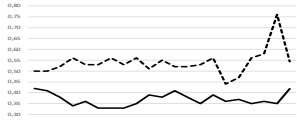
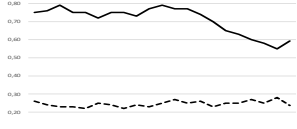
In addition, the Czech Republic has a significant level of biogas production potential. These countries are quite capable of overcoming the risk that will arise as a result of the energy embargo from Russia.

Slovakia currently has a sufficient level of gas in its storage facilities to meet its needs, but it is completely dependent on oil imports from Russia due to the technological features of refineries. Hungary is heavily dependent on Russian fuel, especially oil, and has a low level of supply diversification. Receiving Russian gas in transit through Bulgaria, under the threat of its suspension, the country needs new sources of supply and changes in energy policy. However, for Hungary and Slovakia, the search for alternatives to Russian imports is a long one, and cannot be implemented quickly.

Group 2 – Netherlands (HR), Austria (MR), Germany (MR), Romania (LR), France (KR). This group includes countries with high, medium and low risk - those that at the beginning of the sixth package of EU sanctions had controversy over the imposition of embargo. In the countries of this group there is an inverse relationship between the increase in the level of Energy Freedom Index and the share of fuel imports from Russia in domestic consumption.

Table 3. Comparative analysis of European countries by groups of measures to eliminate dependence on Russian energy imports and readiness for embargo

Country	Dynamics of changes <i>Ief</i> (solid line) and <i>Imr</i> (dashed line)	Implemented actions on the embargo	Diversification	Use of clean energy	Reduction of energy intensity	Increasing own production and (or) construction of own LNG terminals
1	2	3	4	5	6	7
<i>Group 1</i>						
<i>Bulgaria</i>	<p>Correlation coefficient +0,20</p> 	Refusal to renew the contract after the expiration of this year	Agreement with Azerbaijan on increasing gas supplies.			<i>Use of a new pipeline with Greece</i>
<i>Slovakia</i>	<p>Correlation coefficient -0,28</p> 	Cessation of veto, but focus on embargo relief based on oil-based production from Russia	<i>Searching for a solution</i>			Development of strategies for the introduction of new technologies of other types of oil refining

<i>Hungary</i>	<p>Correlation coefficient $-0,28$</p> 	Refusal of the embargo. Ban on the supply of coal from Russia	Searching for a solution			
<i>Czech Republic</i>	<p>Correlation coefficient $-0,43$</p> 	Needs an extension or exemption from the oil embargo	Use of Shell's TAL oil pipeline			

At the same time, the Energy Freedom Index in 2020 increased only in Germany and France, while in other countries it decreased. In Austria, when the share of fuel imports from Russia in domestic consumption decreased, the level of the Energy Freedom Index also decreased. This shows that the country's energy dependence is moderate. Austria has long had Kazakhstan, Libya and Iran as key oil suppliers, but high dependence on gas has caused the country to hesitate in deciding on an embargo. Germany, which has a developed industry, needs much more energy than it produces. The supply of fuel resources is limited by pipelines, which complicates the diversification process. The country is considering the supply of liquefied natural gas from Qatar, which will allow the gradual abandonment of Russian gas, for this purpose will be used terminals to receive gas from tankers. The partnership agreed with Qatar includes not only LNG supplies, but also the development of renewable energy sources, as well as energy efficiency measures [26]. Romania's measures are aimed at the development of foreign economic activity and gas production from the Black Sea shelf. However, these projects are long. The Netherlands is currently unable to completely cut off all fossil fuel supplies from Russia, but is refusing to transport it, and the country is focused on import diversification. To this end, floating regasification plants (LNG terminal) are being leased for future LNG gas uptake in Emshaven, Groningen [27]. France receives about 70% of its electricity from nuclear energy. The country has abandoned its previous government's policy of reducing the share of nuclear generation, and this year announced plans to build six new reactors and consider building eight more. This provides the country with a high level of energy security. Thus, the countries of this group have the opportunity to replace imported fossil fuels from Russia, so an embargo is possible. The threat of loss of energy independence that could occur in the event of further dependence on Russia can be eliminated (as shown in Table 3).

Group 3 – Lithuania (HR), Belgium (MR), Italy (MR), Finland (MR), Poland (LR). This group of countries includes high, medium and low risk countries - those that have supported or expressed the readiness to impose an embargo. With the exception of Lithuania, the countries of this group have a low level of dependence on Russian fossil

fuels. The defining feature of the countries of this group is the growth of the Energy Freedom Index and the decline in the share of fuel imports from Russia in domestic consumption, which indicates an intensification of efforts in these areas. Poland is actively looking for opportunities to diversify supplies and increase its own production. With an expanded LNG terminal, the country is stepping up the commissioning of the Baltic Pipeline, which will provide it with gas connections with Lithuania and Slovakia. [28]. Italy is focusing on diversification and finding new suppliers, and Algeria is currently being considered as such. In addition, the possibility of building a pipeline to supply gas from Spain is being discussed. Belgium has a strong nuclear power industry but is an importer of fuel resources. Although a fairly high proportion of them imported from Russia, the country has taken steps to diversify its sources of supply, importing oil from Iran and Saudi Arabia and gas from Qatar, the Netherlands and Norway. Lithuania's economy is heavily dependent on Russian fuel imports, but the country was one of the first to abandon it. Currently, the country is focused on imports through the LNG terminal in Klaipeda from other suppliers and the development of green energy. Finland is focusing on new gas import agreements, including an agreement with Estonia. A characteristic feature of Group 3 countries is the low level of LNG use.

Group 4 – Greece (HR), Estonia (MR), Ireland (MR), Spain (MR), Cyprus (MR), Luxembourg (MR), Malta (MR), Portugal (MR), Slovenia (MR), Denmark (MR), Latvia (MR). This group of countries includes countries with high, medium and low risk - those that have low dependence on imports of fuel resources from Russia and support the embargo, because they risk the least. The level of their energy independence is determined mainly by other factors. With the exception of Denmark, Estonia and Ireland, all countries in the group have seen an increase in the Energy Freedom Index in recent years. Latvia, which transported gas from Russia, is now relying on the supply of liquefied gas through the Klaipėdos Nafta terminal [29] and is stepping up its green energy policy. Luxembourg has the ability to quickly give up Russian coal but needs oil and gas. The Slovenian government, although it has not given up on Russian fuel, has expressed its readiness to support EU actions in this direction. The country is now focusing on obtaining liquefied natural gas from a terminal in Croatia. Estonia had a high level of gas supplies from Russia, but decided on a strategy of diversification, in particular, the ports will be set up to receive liquefied natural gas. Spain was still the largest importer of LNG from the United States – in 2021 its share rose to 65% [6; 8]. Almost all of Ireland's imports are to the UK, the country focuses on the development of renewable energy sources. Countries such as Cyprus, Greece, and Malta are located in warm natural climates, fossil fuels are used only for industrial purposes. However, the key industry of these countries is shipping, they are engaged in the transportation of oil by sea, and in the embargo see a certain threat of loss of traffic [30]. Greece is focused on the construction of new LNG floating stations. To this end, a project has been launched to build a floating liquefied natural gas terminal in Alexandroupolis

[31]. The terminal is scheduled to be completed by the end of 2023, which will identify Greece as the center of EU gas reserves.

2.4. Risks and losses of Ukraine's energy as a result of the military invasion of the Russian Federation

In 2019, the Energy Freedom Index of Ukraine was 0.70 and ranked 49th out of 142 countries in the overall ranking [2]. Among the EU countries, only Romania and Denmark were ahead of it.

It should be noted that in 2020 Ukraine's Energy Freedom Index increased by 10% to 0.77 and the overall Ief and energy potential subindex surpassed all EU countries, and the energy balance subindex ranked 3rd. The high energy potential and the general trend of growing energy independence allowed Ukraine to develop an export-oriented energy policy. It had every prospect of becoming a competitive and full-fledged player in the European energy market.

At the same time, Ukraine depends on oil imports by about 83%, 33% on natural gas imports, and 50% on coal imports [32]. This situation is due to the lack of incentives for the development of own energy production, significant depletion of explored fields, and constant changes in government regulation on the rent for hydrocarbon production. Over the past few years, the state has paid more attention to eliminating dependence on gas imports. Therefore, in 2021, imports of oil and petroleum products from Belarus to Ukraine exceeded 2.86 billion dollars, and imports of these resources from Russia amounted to about 3.43 billion dollars [33].

Even before the beginning of the military aggression on February 24, 2022, Ukraine was actively implementing measures to reduce energy dependence on Russia. Such measures have received additional support from other countries. Thus, Energoatom and all its stations were transferred to the Paris Center of the World Association of Nuclear Operators (until now, Ukrainian nuclear power plants were part of the Moscow center WANO). All operating nuclear power plants are operating stably, despite losses. It was planned to build a storage facility for spent nuclear fuel. Ukraine has refused to purchase Russian nuclear fuel. Currently, fuel reserves for WWER-1000 reactors will be enough for two years. During this period, it is planned to equip one of the Ukrainian enterprises with a production line for assembling Westinghouse fuel assemblies.

The Ukrainian power system has finally disconnected from the power systems of Russia and Belarus and joined the European Network of Transmission System Operators

for Electricity (ENTSO-E). Accession provides a bilateral advantage: on the one hand, it is an opportunity for European business to work in the energy market of Ukraine, on the other – the development of the European energy market by domestic companies.

Military action has halted the active development of renewable energy that has been observed in Ukraine in recent years. Solar energy suffers the most due to the large area of damaged industrial solar generation facilities. Thus, according to various estimates, 30-40% of solar power plants in the regions affected by the Russian invasion were affected (1120-1500 MW of installed capacity). More than two thirds of all wind power plants have been shut down. 10-15% of the installed capacity of bioenergy facilities was affected [34].

Gas imports from Europe are uninterrupted, in March 2022 the volume of imports amounted to 10 million cubic meters per day. Hungary provides the maximum volume of Ukraine daily imports (about 4.5 million cubic meters per day) [35]. The GTS operators of Slovakia and Poland also provided additional guaranteed capacity for gas imports to Ukraine.

Ukraine is also currently undergoing changes in the market for imports of oil and oil products, where Russia and Belarus used to be key suppliers. The search for new suppliers and the damage caused by hostilities at the largest domestic refineries, Kremenchuk and Shebelynsky, provoked a shortage in the market and a significant increase in product prices.

The outlined measures will increase the level of Ukraine's energy independence, as well as ensure full participation in the European electricity market in the postwar period. However, repairing the damage will require global financial support.

3. CONCLUSIONS

1. Analysis of the energy independence of the European Union, after the Russian military intervention in Ukraine, showed significant negative consequences. Unflexible and multi-vector energy policy of industrialized EU countries, and their underutilization of energy potential, including the development of renewable energy, and low energy balance have led to import dependence on one energy supplier, and limited opportunities to use their own energy sources. The consequence of such an imbalance is the economic dependence of countries with developed economies on the Russian Federation, which has a predominantly raw-materials-based economy.

2. For a long time, European countries have been increasing their dependence on Russia's fuel resources through slow implementation of reforms, differentiation of suppliers, and development of energy infrastructure, considering it economically feasible to use existing exporters and traditional transit infrastructure. The energy crisis of 2021 revealed the following problems of Europe's energy system:

- limited gas transportation capacity;
- inadequate geographical location or insufficient length of existing gas pipelines in the EU;
- lack of LNG terminals and seaports in some countries;
- failure of the existing level of developing renewable energy to meet energy needs.

3. In such circumstances, the implementation of the strategy of energy independence of European countries from the Russian Federation should focus on two basic areas:

- diversification of supplies;
- accelerated transition to the production and use of clean energy.

Studies have shown that both directions have significant limitations and could lead to a complete abandonment of Russian energy at best in 2030, which significantly complicates the imposition of a full embargo on energy imports from this country until 2030.

4. An alternative to a full embargo could be a sharp reduction in energy imports, imposing a 40% tariff on it, which would reduce imports by about 80%. This will reduce economic losses for the countries, which are most dependent on Russian energy. The economic effect of changing energy supply strategies for European countries will depend on the replacement and redistribution of energy between sectors.

5. The study of the level of energy independence of European countries provided an opportunity to identify four key groups of countries on this indicator:

- with a high level of energy independence and a low level of risk of its loss;
- with a sufficient level of energy independence and an acceptable level of risk of its loss;
- with an acceptable level of energy independence and an increased level of risk of its loss;
- with a low level of energy independence and a high level of risk of losing it.

The analysis showed that in the first and second groups of countries, there are those who have an increased risk of losing energy independence due to the embargo on energy from Russia. These risks must be minimized through the introduction and implementation of planned EU measures aimed at diversifying supplies and accelerating the transition to the production and use of clean energy.

6. Russia's full-scale military invasion of Ukraine has led to the irreparable destruction and destabilization of the country's energy system, which was previously closely integrated with the respective systems of Russia and Belarus. As a result of hostilities, the largest domestic refineries, Kremenchuk and Shebelynsky, were damaged. There were destabilized energy supply chains from Europe, which led to a significant deficit

in the energy market and a significant increase in product prices. In response to all the devastating phenomena since February 24, 2022, Ukraine has joined the ENTSO-E integrated power system of continental Europe, disconnected from the energy systems of Russia and Belarus, and established supply chains for oil products from Europe. Despite the fighting and the capture of the largest Zaporizhzhya nuclear power plant in Europe by Russian troops, Ukraine's energy system has been operating smoothly throughout the Russian aggression. These measures are gradually increasing the level of Ukraine's energy independence and should ensure its full participation in the European market in the postwar period. However, repairing large-scale damage will require global political and financial support.

LITERATURE

1. Statistical office of the European Communities, General and regional statistics, 2021. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat>.
2. "Index of Energy Freedom of countries and regions of the world: methods of calculation and analysis" (in Ukrainian) in Foresight: challenges of energy independence of countries and regions of the world in mid-term (until 2025) and long-term (until 2030) time horizons,
3. M. Z. Zgurovsky, Ed., Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky KPI, Polytechnica PH, 2021, pp. 9-31.
4. International Energy Agency, Reliance on Russian Fossil Fuels Data Explorer, March, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/reliance-on-russian-fossil-fuels-data-explorer>.
5. European Commission: Quarterly Report on European Electricity Markets, 2021. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/quarterly_report_on_european_electricity_markets_q4_2020.pdf.
6. European Commission, Gas and electricity market reports, 2020. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/market-analysis_en.
7. European Commission: Quarterly report on European gas markets, 2021. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-04/Quarterly%20report%20on%20European%20gas%20markets_Q4%202021.pdf.
8. Our World in Data. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/grapher/gas-consumption-by-country?tab=chart&time=2000..latest&country=LTU~NLD~FIN~SWE>.
9. International Energy Agency, Gas Market Report, Q2-2022, 2022. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cfd2441e-cd24-413f-bc9f-eb5ab7d82076/Gas-MarketReport%2CQ2-2022.pdf>.
10. Statistical Review of World Energy – all data, 1965-2000. Bp. [Online]. Available: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
11. OECD: Energy prices are spiking, March 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.oecd.org/coronavirus/en/data-insights/energy-prices-are-spiking>.
12. Trading economics: Coal. [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/commodity>.

13. European Commission, REPowerEU: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy, March 08, 2022. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1511.
14. International Energy Agency: A 10-point plan to reduce the European Union's reliance on Russian natural gas, March 6, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/a-10-point-plan-to-reduce-the-european-unions-reliance-on-russian-natural-gas>.
15. European Parliament, MEPs back plans to restock gas reserves before next winter, April 07, 2022. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20220401IPR26536/el-pe-apoya-el-plan-para-almacenar-gas-de-cara-al-proximo-invierno>.
16. Council of the European Union: Versailles Declaration, March 11, 2022. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/media/54773/20220311-versailles-declaration-en.pdf>.
17. J. Buzek et al., "An exchange of views on the second EU Taxonomy Delegated Act", European Energy Forum, March 03, 2022. [Online] Available: <http://www.europeanenergyforum.eu/events/exchange-views-second-eu-taxonomy-delegated-act>.
18. L. Boehm, "Russia's war on Ukraine: Implications for EU energy supply", European parliamentary research service, March 01, 2022. [Online]. Available: <https://epthinktank.eu/2022/03/01/russias-war-on-ukraine-implications-for-eu-energy-supply>.
19. H. Dempsey, N. Kommenda, L. Hook, C. Campbell, C. Nevitt, and S. Joiner, "Can the EU wean itself off Russian gas?", Financial Times, April 19, 2022. [Online]. Available: <https://ig.ft.com/europes-race-to-replace-russian-gas>.
20. "Austria has given up Russian oil", Ukrainian multimedia platform for broadcasting, (in Ukrainian), April 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/3463443-avstria-vidmovilasa-vid-rosijskoi-nafti.html>.
- I. Surwillo and V. Slakaityte, "With energy at play in the Ukraine war, everybody pays", Danish Institute for International Studies, March 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.diis.dk/en/research/with-energy-play-in-the-ukraine-war-everybody-pays>.
21. M. Saglam, "Can Turkey benefit from Europe's quest to reduce Russian gas?", Al-Monitor, March 09, 2022. [Online]. Available: <https://www.al-monitor.com/originals/2022/03/can-turkey-benefit-europes-quest-reduce-russian-gas>.
22. J. Liboreiro, "After coal, the EU faces an uphill battle to ban Russian oil and gas", Euronews, April 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.euronews.com/my-europe/2022/04/12/after-coal-the-eu-faces-an-uphill-battle-to-ban-russian-oil-and-gas>.
23. E. Fomina, "The European Union will increase LNG purchases from the United States to replace Russian gas", Deutsche Welle, (in Russian), April 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.dw.com/ru/es-uvelichit-zakupki-spg-iz-ssha-dlya-zameny-rossijskogo-gaza/a-61324346>.
24. "Bulgaria agrees to supply gas from US at lower prices than Gazprom", *Economichna pravda*, (in Ukrainian), May 11, 2022. [Online]. Available: <https://www.epravda.com.ua/news/2022/05/11/686912>.
25. "The Czech Republic has found something to replace oil from Russia", *Economichna pravda*, (in Ukrainian), May 6, 2022. [Online]. Available: <https://www.epravda.com.ua/news/2022/05/6/686711>.
26. S. Romashenko "Germany and Qatar agree long-term energy partnership", Deutsche Welle, (in Russian), March 20, 2022. [Online]. Available: <https://p.dw.com/p/48kUR>

27. "Netherlands's Gasunie leases second floating LNG terminal to replace Russian gas" (in Ukrainian), Business Tenzor, May 11, 2022. [Online]. Available: <https://biz.censor.net/n3340621>.
28. "Poland wants to give up Russian gas from 2023. The current contract expires in December", Forbes, (in Ukrainian), March 17, 2022. [Online]. Available: <https://forbes.ua/news/polshcha-z-2023-roku-planue-povnistyu-vidmovitsiya-vid-kupivli-rosiyskogo-gazu-chinniy-kontrakt-zavershuetsya-u-grudni-17032022-4760>.
29. O. Ananyeva and O. Khmarna, "Sponsors of the war: who in the EU supports and who blocks the ban on oil and gas from Russia", Evropeyska pravda, (in Ukrainian), April 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.eurointegration.com.ua/articles/2022/04/20/7138073>.
30. "Some countries have begun to question the effectiveness of the oil embargo against Russia", Comments, (in Ukrainian), May 4, 2022. [Online]. Available: <https://politics.comments.ua/ua/news/foreign-policy/okremi-kraini-pochali-sumnivatisya-v-efektivnosti-naftovogo-embargo-proti-rosii-697982.html>.
31. "Greece becoming Europe energy gateway?", Ekathimerini, May 04, 2022. [Online]. Available: <https://www.ekathimerini.com/economy/1183473/greece-becoming-europe-energy-gateway>.
32. Ukraine energy profile, IEA. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/ukraine-energy-profile>.
33. Countries by commodity structure of foreign trade, State Statistics Committee. [Online]. Available: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/zd/kr_tstr/arh_kr_2021.htm.
34. "Green energy in Ukraine is on the verge of bankruptcy. What's next?", Ekonomichna Pravda, (in Ukrainian), April 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.epravda.com.ua/columns/2022/04/10/685513>.
35. Official site of GTS Ukraine Operator LLC. [Online]. Available: <https://tsoua.com>.

ZAPEWNIENIE NIEZALEŻNOŚCI ENERGETYCZNEJ JAKO NOWE GLOBALNE WYZWANIE DLA BEZPIECZEŃSTWA EUROPEJSKIEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę problemów niezależności energetycznej i zaopatrzenia energetycznego krajów europejskich w obliczu skutków pełnoskalowej inwazji militarnej Rosji na Ukrainę. Analiza ta opiera się na opracowanym przez autorów Indeksie Wolności Energetycznej (Ief), który agreguje subindeksy potencjału energetycznego, bilansu energetycznego i rozwoju energetycznego. Na podstawie wartości tego indeksu utworzono ranking 142 krajów świata i określono miejsca krajów UE i Ukrainy w tym rankingu. Przeanalizowano środki mające na celu zwiększenie poziomu niezależności energetycznej krajów europejskich i Ukrainy. Jako główne środki zaproponowano dywersyfikację dostaw i przyspieszone przejście na czystą energię. Kraje europejskie zostały zgrupowane według poziomu strat gospodarczych i bezpieczeństwa spowodowanych embargiem na rosyjskie surowce energetyczne. Wyodrębniono cztery grupy państw pod względem gotowości do zastąpienia rosyjskich surowców energetycznych i nałożenia embarga. Przeanalizowano dynamikę wskaźników indeksu wolności energetycznej oraz ich uzależnienie od importu z Rosji, a także zaproponowano działania mające na celu zmniejszenie tego uzależnienia.

Słowa kluczowe: niezależność energetyczna, indeks wolności energetycznej, pełnoskalowa inwazja Rosji na Ukrainę, zależność od rosyjskich paliw kopalnych