

NAUKA DLA OBRONNOŚCI

**MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA
CZYTEJ ENERGII W SYSTEMACH
BEZPIECZEŃSTWA PAŃSTWA.
SZANSE, OGRANICZENIA, PERSPEKTYWY**

pod redakcją: ANDRZEJA ŻYLUKA
ŁUKASZA SEMKŁO
RAFAŁA ŚLEFARSKIEGO



WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH

WARSZAWA 2026

RECENZENCI

prof. PP dr hab. inż. Damian JOACHIMIAK

prof. PP dr hab. inż. Magda JOACHIMIAK

dr inż. Łukasz BRODZIK

dr inż. Przemysław GRZYMISŁAWSKI

dr inż. Radosław JANKOWSKI

dr inż. Robert KŁOSOWIAK

dr inż. Łukasz SEMKŁO

KOMITET REDAKCYJNY

prof. dr hab. inż. Andrzej ŻYLUK – przewodniczący

prof. PP dr hab. inż. Rafał ŚLEFARSKI

dr inż. Łukasz SEMKŁO

PRZYGOTOWANIE DO DRUKU

Łukasz SEMKŁO

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 Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, wyd. I, 2026 r.

ISBN 978-83-974516-1-2

WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH
01-494 Warszawa 46, ul. Księcia Bolesława 6

Drukowano w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych

PATRONAT HONOROWY



Wiceprezes Rady Ministrów
Minister Obrony Narodowej

Władysław Kosiniak-Kamysz

PATRONAT



PATRONAT MEDIALNY

Defence **24**

PARTNERZY



Instytut Techniczny Wojsk
Lotniczych



Instytut Łączności



Centrum Doktryn i Szkolenia Sił
Zbrojnych



Wojskowa Akademia Techniczna



Instytut Bezpieczeństwa i Rozwoju
Infrastruktury Krytycznej



GRIFFIN GROUP
ENERGY

Gryfin Group ENERGY

KOMITET HONOROWY

prof. Teofil JESIONOWSKI

Rektor, Politechnika Poznańska – przewodniczący

prof. Zbigniew KORUBA

Rektor, Politechnika Świętokrzyska

gen. dr Mieczysław GOCUŁ

Rektor, Akademia Sztuki Wojennej

gen. broni (spocz.) dr Marek TOMASZYCKI

Rektor, Akademia Wojsk Lądowych

gen. bryg. pil. dr Krzysztof CUR

Rektor, Lotnicza Akademia Wojskowa

kadm. prof. Tomasz SZUBRYCHT

Rektor, Akademia Marynarki Wojennej

gen. bryg. prof. Przemysław WACHUŁAK

Rektor, Wojskowa Akademia Techniczna

prof. Mirosław KOWALSKI

Dyrektor, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

KOMITET STERUJĄCY

prof. Zbigniew NADOLNY

Politechnika Poznańska – przewodniczący

gen. bryg. (spocz.) dr inż. Jan DZIEDZIC

Politechnika Poznańska

plk Marek ADAMOWICZ

Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych

KOMITET INICJUJĄCY KONFERENCJĘ

gen. dyw. Dariusz MENDRALA

Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych – przewodniczący

prof. Michał CIAŁKOWSKI

Politechnika Poznańska

gen. bryg. (spocz.) dr inż. Jan DZIEDZIC

Politechnika Poznańska

śp. gen. bryg. Piotr WAGNER

Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych

KOMITET NAUKOWY

prof. Rafał ŚLEFARSKI

Politechnika Poznańska – przewodniczący

prof. Zbigniew NADOLNY

Politechnika Poznańska

gen. dyw. dr pil. Ireneusz NOWAK

Dowództwo Generalne Rodzajów Sił Zbrojnych

gen. broni (rez.) dr pil. Tadeusz MIKUTEL

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

wiceadm. Jarosław WYPIJEWSKI

Sztab Generalny Wojska Polskiego

nadinsp. (spocz.) dr Piotr MAKA

Politechnika Poznańska

plk prof. Bartosz KOZICKI

Wojskowa Akademia Techniczna

plk prof. Mariusz ZIEJA

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

plk (rez.) prof. Stanisław KACHEL

Wojskowa Akademia Techniczna

prof. Andrzej FRĄCKOWIAK

Politechnika Poznańska

prof. Mariusz FIGURSKI

Politechnika Gdańska

prof. Przemysław DAROSZEWSKI

Szpital Ortopedyczno-Rehabilitacyjny Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu

prof. Tomasz MRÓZ

Politechnika Poznańska

prof. Sławomir STĘPIEŃ

Politechnika Poznańska

prof. Waldemar KUCZYŃSKI

Politechnika Koszalińska

prof. Jacek ELIASZ

Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny

plk (rez.) prof. Mieczysław PAWLISIAK

Wojskowa Akademia Techniczna

prof. Mirosław KOWALSKI

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

prof. Andrzej ŻYLUK

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

plk (rez.) dr Marek KALWASIŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna

plk (rez.) dr Dariusz NAGRABSKI

Wojskowa Akademia Techniczna

plk dr Andrzej LIS

Centrum Doktryn i Szkoleń Sił Zbrojnych

prof. Ireneusz PIELECHA

Politechnika Poznańska

prof. Paweł FUĆ

Politechnika Poznańska

plk (rez.) Mariusz LIPIŃSKI

Stowarzyszenie Przyjaciół Lotniska w Świdwinie

dr Łukasz SEMKŁO

Politechnika Poznańska

dr Robert KŁOSOWIAK

Politechnika Poznańska

dr Radosław JANKOWSKI

Politechnika Poznańska

KOMITET ORGANIZACYJNY

plk Marek ADAMOWICZ – przewodniczący

Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych

plk dr Grzegorz LISOWSKI

Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych

dr Łukasz SEMKŁO

Politechnika Poznańska

Justyna TULIŃSKA

Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych

Ewa MARKIEWICZ

Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych

SŁOWO WSTĘPNE

„Czysta energia” to energia pozyskiwana ze źródeł, które podczas wytwarzania i użytkowania nie emitują gazów cieplarnianych ani innych zanieczyszczeń, a jednocześnie wywierają możliwie najmniejszy wpływ na środowisko. W obliczu wyzwań związanych z dostępnością tradycyjnych surowców, rosnących regulacji ekologicznych oraz zagrożeń dla ciągłości dostaw energii, zagadnienie to staje się coraz ważniejsze – nie tylko dla gospodarki i społeczeństwa, lecz także dla instytucji odpowiedzialnych za bezpieczeństwo państwa.

Dla wszystkich tych podmiotów, które można traktować jako elementy systemu logistyki obronnej państwa, kluczowe znaczenie ma ciągłość dostaw energii i jej dostępność, ponieważ to one decydują o odporności takich obszarów jak bankowość, telekomunikacja, ochrona zdrowia, transport, opieka społeczna, edukacja czy funkcjonowanie służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo obywateli.

Współczesne środowisko bezpieczeństwa pozostaje niestabilne i pełne wyzwań, wynikających m.in. z kryzysów, konfliktów zbrojnych, zmian klimatycznych oraz zagrożeń w cyberprzestrzeni. Dodatkowo ograniczenia w dostępie do surowców energetycznych i metali ziem rzadkich wymuszają poszukiwanie nowych rozwiązań w zakresie pozyskiwania, dystrybucji i wykorzystania energii. Coraz większego znaczenia nabierają więc systemy rozproszone, krótsze i bardziej elastyczne łańcuchy dostaw oraz działania ukierunkowane na ograniczanie zużycia energii, poprawę efektywności energetycznej i rozwój jej magazynowania. Rozwiązania te są dziś uznawane za jeden z warunków budowania odporności i zdolności funkcjonowania w wymagającym środowisku bezpieczeństwa.

Planowane przedsięwzięcie stanowi kontynuację działań Politechniki Poznańskiej, ukierunkowanych na wymianę poglądów w gronie specjalistów oraz edukację społeczeństwa w zakresie odporności energetycznej. W poprzednich latach problematyka ta była przedmiotem konferencji poświęconych m.in. bezpieczeństwu infrastruktury krytycznej (Poznań, 2022), roli Sił Powietrznych w jej ochronie (Świdwin, 2023) oraz logistyce wojskowej i cywilnej w kontekście zapewnienia odporności energetycznej Siłom Zbrojnym (Bydgoszcz, 2024).

Tegoroczna konferencja ma charakter jubileuszowy, ponieważ odbywa się w dziesiątą rocznicę oraz stanowi piątą edycję tego wydarzenia. Dotychczasowe konferencje z cyklu „Nauka dla Obronności” koncentrowały się wokół kluczowych aspektów bezpieczeństwa i stanowiły inspirację dla środowisk naukowych, instytu-

cji oraz partnerów społeczno-gospodarczych do poszukiwania rozwiązań wzmacniających odporność państwa.

Obecna edycja, realizowana wspólnie z Inspektorem Wsparcia Sił Zbrojnych i partnerami, poświęcona jest możliwościom wykorzystania „czystej energii” w systemach bezpieczeństwa państwa, ze szczególnym uwzględnieniem zarówno szans, jak i ograniczeń tych rozwiązań oraz kierunków ich dalszego rozwoju. Konferencja ma również na celu stworzenie przestrzeni do wymiany opinii, dyskusji oraz formułowania wniosków, które mogą stanowić podstawę dla rekomendacji kierowanych do decydentów odpowiedzialnych za rozwój systemów bezpieczeństwa energetycznego.

Organizatorzy składają podziękowania wszystkim osobom i instytucjom zaangażowanym w przygotowanie konferencji, a także uczestnikom debat oraz autorom publikacji zamieszczonych w niniejszej monografii.

Szczególne podziękowania kierujemy do Wicepremiera, Ministra Obrony Narodowej, Pana Władysława Kosiniaka-Kamysza, za objęcie wydarzenia patronatem honorowym.

Wyrazy wdzięczności składamy również Panu Jędrzejowi Graffowi, Redaktorowi Naczelnemu portalu Defence24, za patronat medialny, a także wszystkim partnerom przedsięwzięcia: Rządowemu Centrum Bezpieczeństwa, Instytutowi Łączności – Państwowemu Instytutowi Badawczemu, Centrum Doktryn i Szkolenia Sił Zbrojnych, Wojskowej Akademii Technicznej, Instytutowi Technicznemu Wojsk Lotniczych, Instytutowi Bezpieczeństwa i Rozwoju Infrastruktury Krytycznej oraz firmie Griffin Energy Group.

Wszystkim prelegentom i uczestnikom życzymy owocnych obrad oraz dziękujemy za zainteresowanie niniejszą monografią.

Szef Inspektoratu Wsparcia SZ
gen dyw. Dariusz Mendrala

Rektor Politechniki Poznańskiej
prof. dr hab. inż. Teofil Jesionowski

SPIS TREŚCI

<i>Karolina BRZEZIŃSKA, Magdalena KUBIS</i> Znaczenie czystej energii na współczesnym polu walki – innowacyjne technologie.....	1
<i>Michał CIAŁKOWSKI, Bartosz CIUPEK, Andrzej FRĄCKOWIAK, Janusz ZMYWACZYK, Tadeusz MIKUTEL</i> Algorytm wyznaczania obciążenia cieplnego lufy w trakcie seryjnego oddawania strzałów.....	11
<i>Jan DZIEDZIC</i> Czysta energia determinantem transformacji, efektywności i odporności łańcuchów dostaw.....	31
<i>Jacek ELIASZ, Agnieszka KALBARCZYK-JEDYNAK, Mariusz SOWIŃSKI, Krzysztof OŁDAKOWSKI</i> Interaktywny magazyn energii – założenia koncepcyjne	47
<i>Mariusz FIGURSKI, Rafał NISKI, Wojciech ŻURAWSKI,</i> Polska Tarcza PNT jako fundament odporności państwa na zakłócenia GNSS	59
<i>Andrzej GĘBURA, Sławomir MICHALAK, Tomasz TOKARSKI, Tomasz GAJEWSKI</i> Mobilna polowa stacja zasilania elektroenergetycznego jako odnawialne ekologiczne źródło energii.....	77
<i>Rafał GRZEGORCZYK, Jan DZIEDZIC, Marianna JANKOWSKA, Bartosz CIUPEK, Andrzej FRĄCKOWIAK, Michał CIAŁKOWSKI</i> Potencjał energetyczny biomasy drzewnej w kreowaniu wysp energetycznych dla obszarów strategicznych	99
<i>Agnieszka IWAN, Ireneusz PLEBANKIEWICZ, Wojciech PRZYBYŁ, Marcin SZCZEPANIAK, Krzysztof A. BOGDANOWICZ, Witalis PELLOWSKI</i> Innowacyjne modułowe urządzenia energetyczne oparte na integracji ogniw fotowoltaicznych, turbin wiatrowych oraz magazynów energii.....	115

<i>Tomasz KARPÍŃSKI</i>	
Analiza i porównanie osiąguów silników współczesnych myśliwców polskich Sił Zbrojnych w trakcie zadania bojowego	127
<i>Robert KŁOSOWIAK</i>	
Ogniwa paliwowe typu direct carbon fuel cell w systemach bezpieczeństwa państwa: analiza konfiguracji, materiałów i ograniczeń wdrożeniowych	139
<i>Zdzisław KOBOS</i>	
Psychologiczne aspekty solastalgii a eksploatacja środowiska przyrodniczego i konsekwencje dla człowieka.....	151
<i>Sebastian KOWALCZYK, Katarzyna JANEK, Wojciech ŻURAWSKI</i>	
Rozwój energetyki odnawialnej a bezpieczeństwo państwa – rola nowoczesnego systemu wspierającego procesy planowania i uzgadniania inwestycji w obszarze obronności państwa	161
<i>Michał KRYSZTOFEK, Marta ŚLEFARSKA, Aleksandra NOWAK</i>	
Zielony metanol jako paliwo alternatywne do zasilania systemów generacji energii elektrycznej i ciepłej	173
<i>Piotr MAKA, Monika PAWLAK, Sławomir STĘPIEŃ</i>	
Optymalizacja zużycia energii w policyjnych systemach bezzałogowych w kontekście sterowania i prowadzenia działań operacyjno-rozpoznawczych	187
<i>Judyta PASZKOWSKA, Rafał ŚLEFARSKI</i>	
Wykorzystanie niskotemperaturowego ciepła odpadowego w systemach energetycznych: potencjał, technologie i znaczenie dla bezpieczeństwa energetycznego	207
<i>Witalis PELLOWSKI, Agnieszka IWAN, Adam JANUSZKO</i>	
Nuklearny konwerter energii z plazmowym wzmocnieniem scyntytacji i efektem Purcella	219
<i>Piotr PIĄTKOWSKI, Waldemar KUCZYŃSKI, Irenusz PIELECHA</i>	
System napędowy pojazdu elektrycznego jako źródło energii użytkowej w warunkach terenowych	229

<i>Mirosław PŁOMIŃSKI, Wojciech ŻURAWSKI, Marcin SIENICKI</i> Reaktywne Działania SZRP w procesie inwestycji energetycznych związanych z budową Morskich Farm Wiatrowych. Systemowa odpowiedź państwa polskiego na atak hybrydowy na systemy nawigacji satelitarnej	239
<i>Sławomir SZRAMA, Szymon LEWICKI</i> Odporność infrastruktury nawigacji satelitarnej na zakłócenia GNSS w kontekście bezpieczeństwa państwa i ciągłości działania systemów krytycznych.....	263
<i>Anna WIKTOROWSKA-JASIK, Adrianna JASIK</i> Możliwości i ograniczenia wykorzystania czystej energii w transporcie i logistyce.....	273
<i>Karolina WYŻKIEWICZ, Damian JOACHIMIAK</i> Pomiar temperatury w ciałach stałych – analiza literatury oraz przykład obliczeniowy	285

Karolina BRZEZIŃSKA*
Magdalena KUBIS*

ZNACZENIE CZYSTEJ ENERGII NA WSPÓŁCZESNYM POLU WALKI - INNOWACYJNE TECHNOLOGIE

Artykuł analizuje znaczenie energii na współczesnym polu walki oraz rozwój technologii energetycznych. Przedstawiono nowoczesne rozwiązania w zakresie wytwarzania, magazynowania i zarządzania energią. Omówiono znaczenie energii dla systemów uzbrojenia, łączności i rozpoznania. Wskazano kluczowe czynniki rozwoju oraz kierunki transformacji energetycznej w sektorze obrony państwa. Szczególną uwagę poświęcono roli odnawialnych źródeł energii w zwiększaniu bezpieczeństwa energetycznego oraz autonomii operacyjnej sił zbrojnych.

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, pole walki, technologie, logistyka

1. WPROWADZENIE

Współczesne pole walki charakteryzuje się dynamicznym rozwojem technologii oraz rosnącym znaczeniem energii jako kluczowego zasobu operacyjnego. Energia warunkuje działanie systemów uzbrojenia, łączności, rozpoznania oraz wsparcia logistycznego. Rozwój technologii takich jak systemy bezzałogowe, sztuczna inteligencja czy zaawansowana elektronika powoduje wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Nowoczesne siły zbrojne dążą do zwiększenia efektywności energetycznej oraz niezależności od paliw kopalnych.

Znaczenie energii na polu walki wynika również z konieczności zapewnienia ciągłości działania systemów w warunkach bojowych. Brak dostępu do energii może prowadzić do utraty zdolności operacyjnych. Z tego względu rozwijane są technologie magazynowania energii i inteligentne systemy zarządzania.

* Studenckie Koło Naukowe INNTANS, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

Rozwój odnawialnych źródeł energii, takich jak energia słoneczna czy ogniwa paliwowe, stanowi istotny kierunek transformacji energetycznej w sektorze obronnym, Technologie te pozwalają na zwiększenie mobilności oraz redukcję emisji zanieczyszczeń.

Celem artykułu jest analiza znaczenia energetycznego na współczesnym polu walki ze szczególnym uwzględnieniem możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii w systemach obronności państwa, a także ocena ich wpływu na zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego i efektywności operacyjnej sił zbrojnych.

2. ISTOTA I ZNACZENIE ENERGII POLA WALKI

Energia stanowi jeden z kluczowych zasobów, które mają istotny wpływ na funkcjonowanie współczesnych sił zbrojnych oraz przebieg działań militarnych. W obliczu dynamicznie zmieniającego się pola walki, które cechuje wysoki poziom nasycenia technologią, dostęp do stabilnych i efektywnych źródeł energii staje się kluczowym czynnikiem determinującym zdolność do prowadzenia operacji bojowych. W kontekście systemowym, energia na polu walki obejmuje wszystkie etapy, począwszy od jej wytwarzania, przez dystrybucję i magazynowanie, aż po skuteczne wykorzystanie w różnych systemach wojskowych.

W dzisiejszych czasach pole walki ewoluje w kierunku coraz większej zależności od nowoczesnych technologii, które odgrywają kluczową rolę w strategiach militarnych. Elementy takie jak drony, zaawansowane systemy komunikacyjne, technologie rozpoznania oraz nowoczesne uzbrojenie stają się nieodłącznymi składnikami współczesnych operacji wojskowych. Każdy z tych komponentów wymaga niezawodnego i ciągłego źródła zasilania, co z kolei prowadzi do wzrastającego zapotrzebowania na energię elektryczną. W obliczu współczesnych wyzwań, efektywne zarządzanie energią zyskuje na znaczeniu dla utrzymania operacyjnej sprawności jednostek wojskowych. Ograniczony dostęp do energii lub jej niewystarczająca ilość mogą istotnie wpłynąć na zdolności operacyjne tych jednostek. W skrajnych przypadkach, niedobór odpowiedniego zasilania może prowadzić do utraty przewagi nad przeciwnikiem, co w kontekście aktualnych konfliktów zbrojnych może mieć poważne konsekwencje. W związku z tym, inwestycje w technologie energetyczne oraz innowacyjne rozwiązania w zakresie zarządzania energią stają się nie tylko kwestią efektywności, ale również kluczowym elementem strategii obronnych w dzisiejszym świecie.

Zgodnie z podejściem zaprezentowanym w literaturze, rozwój oraz wykorzystanie energii na polu bitwy są kształtowane przez szereg różnorodnych czynników, w tym politycznych, prawnych, militarnych, technologicznych oraz ekonomicznych [Chmielarczyk, Nowakowska-Krystman i Owczarczyk 2023]. Te czynniki mają znaczący wpływ na kierunki rozwoju technologii energetycznych oraz na metody ich implementacji w systemach obronnych. Istotne są w tym kontekście uwarunkowania

technologiczne, które determinują możliwość wprowadzenia nowoczesnych, niskoemisyjnych oraz efektywnych źródeł energii.

Wprowadzenie alternatywnych źródeł energii, takich jak ogniwa paliwowe, wodór czy panele słoneczne, ma na celu nie tylko ochronę środowiska i redukcję emisji dwutlenku węgla, ale także minimalizację ryzyka związanego z wrażliwymi łańcuchami dostaw paliw kopalnych w obszarach dotkniętych konfliktami. Dostawy energii, zwłaszcza w kontekście paliw płynnych, są krytyczne dla funkcjonowania nowoczesnej armii, dlatego mogą one stanowić ważny cel ataków wroga, by znacząco osłabić wojska przeciwników. Analizy wskazują, że zużycie paliwa znacząco wzrosło w ostatnich dziesięcioleciach, co sprawia, że optymalizacja energetyczna staje się jednym z kluczowych wyzwań przyszytych konfliktów zbrojnych [Onet Wiadomości 2026].

3. NOWOCZESNE ALTERNATYWNE ŹRÓDŁA WYTWARZANIA ENERGII

3.1. Ogniwa paliwowe

Ogniwa paliwowe typu PEM (Proton Exchange Membrane/Polymer Electrolyte Membrane) stanowią wysokoefektywne źródła energii, osiągające sprawność wynoszącą nawet 65% [Politechnika Wrocławska 2020]. Takie ogniwa wyposażone są w membranę wymieniającą protony. Idealnie nadają się do napędów pojazdów i systemów przenośnych. Wykorzystanie takiego źródła energii nie jest nowym wynalazkiem, gdyż Amerykanie już w 2013 roku opracowali bezzałogowy statek powietrzny ION Tiger (Rys. 1) napędzany ciekłym wodorem (LH_2). W przeprowadzonych testach dron wykazał niezwykłą wytrzymałość, utrzymując się w powietrzu przez imponujący okres 48 godzin bez przerwy [Defence24 2013]. To osiągnięcie ustanawia nowy rekord, który podkreśla zaawansowaną technologię zastosowaną w konstrukcji drona oraz jego zdolność do długotrwałego lotu.

Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych z ogniwami PEM może zapewnić realną szansę dla wojsk na uniezależnienie się od tradycyjnych źródeł energii. Na katodzie zachodzi istotny proces chemiczny, w którym protony oraz elektrony reagują z tlenem obecnym w atmosferze. Ten proces prowadzi do powstania wody lub pary wodnej [Rękas]. Drony, takie jak ION Tiger, charakteryzują się wyjątkowo cichą pracą, co czyni je idealnym rozwiązaniem do realizacji zadań rozpoznawczych. Ich zdolność do niemal bezgłośnego działania sprawia, że są one szczególnie odpowiednie do misji, w których kluczowe są dyskrecja oraz niewidoczność. Dzięki tej właściwości, ION Tiger jest w stanie skutecznie zbierać informacje oraz monitorować teren, jednocześnie minimalizując ryzyko wykrycia przez potencjalnych przeciwników.



Rys. 1. Dron ION Tiger, US Navy [Defence24 2013]

Ogniwa metanolowe (DMFC - Direct Methanol Fuel Cells) wykorzystujące taką samą membranę polimerową jak w przypadku ogniw zasilanych ciekłym wodorem, jedyną różnicą w tych ogniwach jest medium eksploatacyjne. Ogniwa metanolowe wykazują znaczną przewagę nad ogniwami wodorowymi w zakresie dostępności medium energetycznego. Wykorzystują łatwo dostępny w przemyśle metanol, co eliminuje konieczność sprężania wodoru do wysokich ciśnień, zwiększając tym bezpieczeństwo zastosowania w warunkach bojowych.



Rys. 2. Okręt podwodny HDW klasy 212A z metanolowym ogniwem paliwowym [Okretypodwodne.edu.pl 2024]

W jednostkach typu 212A wprowadzono również system napędu niezależnego od powietrza atmosferycznego, znany jako AIP (Air Independent Propulsion). Ten

zaawansowany system napędowy pozwala na dłuższe operacje pod wodą bez konieczności wynurzenia się w celu pobrania tlenu, co znacząco zwiększa zdolności operacyjne okrętów podwodnych. Tego typu napęd jest wykorzystywany w okrętach podwodnych typu 212A (Rys.2) [Michalak et al. 2024]. Okręty podwodne typu 212A mają zdolność do długotrwałego pływania w zanurzeniu, osiągając niewielką prędkość przez okres blisko trzech tygodni. W tym czasie wykorzystują swoje ogniwa paliwowe jako główne źródło energii, co pozwala im na efektywne i ciche operacje podwodne. Dzięki zaawansowanej technologii, te jednostki są w stanie prowadzić misje przez dłuższy czas bez potrzeby wynurzenia się, co stanowi istotną zaletę w kontekście nowoczesnych działań militarnych.

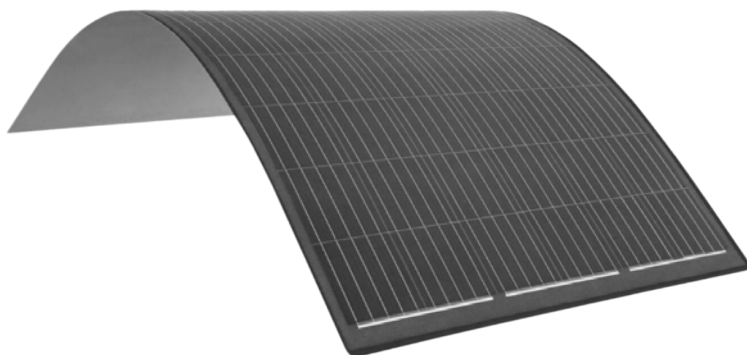
3.2. Odnawialne źródła energii i hybrydowe magazyny energii

Tradycyjne metody zasilania, oparte na agregatach z silnikami Diesla, niosą ze sobą znaczne ryzyko taktyczne, ponieważ ich układy wydechowe nagrzewają się do temperatury około 300 °C. Tworzy to wyraźny blask termiczny, dzięki czemu są łatwymi celami dla systemów rozpoznawczych wroga i dronów, podczas gdy hałas, który generują, ujawnia pozycje wojsk [Gębura, Szelmanowski i Brzozowski 2024, Michalak et al. 2024]. W odpowiedzi na te wyzwania Europejski Fundusz Obronny (w ramach projektu INDY) oraz NATO [Thonon 2026], a także polskie instytucje, takie jak Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych (ITWL), intensywnie pracują nad wdrożeniem systemów fotowoltaicznych (PV) [Gębura, Szelmanowski i Brzozowski 2024, Michalak et al. 2024].

Szczególnie interesującym kierunkiem rozwoju jest koncepcja zintegrowanego indywidualnego systemu wyposażenia, w którym energia jest zbierana bezpośrednio z elementów munduru. Zastosowanie elastycznych włókien fotowoltaicznych na bazie krzemu i germanu (SiGe) pozwala na włączenie ich do tkanin plecaków lub kamizelek taktycznych [Pellowski et al. 2026]. Szacuje się, że powierzchnia 0,2–0,4 m² na umundurowaniu może wygenerować od 5 do 10 W mocy – wystarczy, by zasilić radio taktyczne lub GPS. Dodatkowo inżynierowie dążą do tego, aby włókna te służyły jako ochrona balistyczna o właściwościach podobnych do Kevlaru [Pellowski et al. 2026].

W kontekście polskiej infrastruktury obronnej Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych (ITWL) podkreśla wyraźną przewagę Elastycznych Pokryć Fotowoltaicznych (EPF) (Rys. 3). Stanowią one alternatywę dla ciężkich, zachodnich systemów, jak niemiecki MC66, które są trudne w transporcie i generują demaskujące refleksy świetlne [Gębura, Szelmanowski i Brzozowski 2024, Michalak et al. 2024]. Polski panel EPF o wymiarach 2×1 m waży zaledwie około 7 kg, generując moc 430 W [Gębura, Szelmanowski i Brzozowski 2024]. Można go rozłożyć bezpośrednio na ziemi, idealnie dopasowując do ukształtowania terenu. Jego pofałdowana, półmatowa powierzchnia całkowicie eliminuje odbłaski, a bezgłośna praca w połączeniu z maskowaniem termicznym sprawia, że jest niezwykle trudny do wykrycia [Gębura, Szelmanowski i Brzozowski 2024, Michalak et al. 2024].

Należy jednak pamiętać, że fotowoltaika nie może funkcjonować jako samodzielne źródło energii, ponieważ jest zależna od słońca i może nie sprostać nagłym skokom poboru mocy, np. przy uruchamianiu radarów [Gębura, Szelmanowski i Brzozowski 2024]. Dlatego wojskowe instalacje muszą działać jako systemy hybrydowe, wspierane przez inteligentne systemy zarządzania energią (EMS), superkondensatory oraz lekkie baterie litowo-jonowe. Ciekawym rozwiązaniem na brak słońca w nocy jest łączenie paneli PV z metanolowymi ogniwami paliwowymi (DMFC), które są bezpieczniejsze od układów wodorowych pod wysokim ciśnieniem. Co istotne, emitują ciepło zbliżone do temperatury ciała człowieka, co pomaga w utrzymaniu maskowania termicznego bazy przez całą dobę [Gębura, Szelmanowski i Brzozowski 2024, Michalak et al. 2024].



Rys. 3. Elastyczne panele fotowoltaiczne [JJ Energy Group b.d.]

Kolejnym bardzo ważnym elementem systemów energetycznych w wojsku są superkondensatory (Rys. 4), które stanowią dopełnienie dla wcześniej opisywanych technologii. Wynika to z faktu, że odnawialne źródła energii, takie jak ogniwa paliwowe czy panele fotowoltaiczne posiadają bardzo niską przeciążalność, co oznacza, że nie są one w stanie dostarczyć odpowiedniej ilości energii. Na współczesnym polu walki taka zdolność jest niezbędna, chociażby do rozruchu silników głównych statków powietrznych. Zastosowanie turbostartera generuje skokowe zapotrzebowanie na prąd 600-800 amperów, podczas gdy dla bezpośredniego rozruchu maszyn ciężkich, takich jak śmigłowiec Mi-8, wartość ta osiąga od 1200 do nawet 1500 amperów. W takich momentach pojawia się krótkotrwały niedobór energii (trwający do 80 milisekund), który najlepiej uzupełniają superkondensatory, potrafiące uwalniać zmagazynowaną moc znacznie szybciej i gwałtowniej niż zwykłe akumulatory [Gębura, Szelmanowski i Brzozowski 2024, Michalak et al. 2024].



Rys. 4. Superkondensator firmy Maxwell Technologies [Ekologia.pl]

Wyjątkowa skuteczność tych urządzeń wynika bezpośrednio z ich budowy opartej na porowatych płytach węglowych. Powierzchnia czynna tych płyt jest tak silnie rozwinięta, że osiąga parametry rzędu $3000 \text{ m}^2/\text{g}$, co pozwala urządzeniu o niewielkich wymiarach na magazynowanie ogromnej pojemności liczonej w tysiącach faradów. Z punktu widzenia logistyki i trwałości sprzętu niezwykle ważne jest, że w mechanizmie ich działania nie zachodzą reakcje chemiczne, co czyni proces magazynowania prądu w pełni odwracalnym. Przekłada się to na imponującą żywotność, ponieważ najnowsze superkondensatory potrafią wytrzymać nawet milion cykli ładowania i rozładowania, co znacząco przewyższa możliwości standardowych baterii [Gębura, Szelmanowski i Brzozowski 2024, Michalak et al. 2024].

Warto również wspomnieć, że analizy prowadzone w ramach projektów takich jak INDY wskazują na superkondensatory jako najbardziej obiecujące rozwiązanie do magazynowania energii w klimacie arktycznym [Thonon 2026]. Bardzo ciekawym i przyszłościowym kierunkiem badań są tak zwane strukturalne magazyny energii. Obejmują one rozwój superkondensatorów, które mogłyby jednocześnie magazynować prąd i przenosić obciążenia mechaniczne jako fizyczny element konstrukcji pojazdu czy drona. Takie podejście pozwoliłoby w przyszłości na znaczną redukcję masy sprzętu wojskowego przy jednoczesnym zwiększeniu jego wydajności. Ostatecznie, w wojskowych mikrosieciach pełnią one rolę niezastąpionego bufora, który błyskawicznie reaguje na zapotrzebowanie, z którym sama fotowoltaika nie mogłaby sobie poradzić [Pellowski et al. 2026].

4. PODSUMOWANIE

Energia Pola Walki staje się kluczowym elementem operacyjnym, wpływającym na mobilność, komunikację oraz siłę ognia nowoczesnej armii. Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną jest znaczący, co jest wynikiem rosnącego wykorzystania nowoczesnych systemów, robotyki oraz zaawansowanej sensoryki w kontekście militarnym. Tradycyjne paliwa kopalne stanowią aż 70% towarów transportowanych na pole walki, co prowadzi do niebezpiecznej zależności logistycznej oraz sprawia, że wrażliwe linie komunikacyjne stają się priorytetowym celem dla przeciwnika. Z tego powodu nowoczesne technologie energetyczne dążą do decentralizacji samowystarczalności poprzez rozwój tzw. „cichej domeny” [Marcinko 2024], która wykorzystuje napędy elektryczne i hybrydowe dla radykalnego obniżenia sygnatury akustycznej i termicznej sprzętu. Tradycyjne agregaty dieslowskie są łatwo wykrywalne ze względu na wysoki poziom hałasu i poświatę termiczną sięgającą 300°C, dlatego wojsko zwraca się ku ekologicznym źródłom zasilania, takim jak ogniwa paliwowe i fotowoltaika [Michalak et al. 2024].

Wśród technologii wodorowych preferowane są ogniwa metanolowe (DMFC), ponieważ metanol jest płynem łatwiejszym w przechowywaniu i bezpieczniejszym w warunkach bojowych niż wodór sprężony do 300 atmosfer, który w razie trafienia odłamkiem może zamienić się w materiał wybuchowy. Co w takim przypadku również może stworzyć potencjalne ataki na zbiorniki wodorowe. Fotowoltaika ewoluje w stronę elastycznych pokryć (EPF), które ważą zaledwie 7 kg, dopasowują się do ukształtowania terenu i posiadają pofałdowaną, matową powierzchnię eliminującą demaskujące odbłaski słońca.

Wojsko wyposażone w takie systemy potrzebuje również nowoczesnych magazynów energii, w tym akumulatory litowo-jonowe oraz superkondensatory, zdolne do błyskawicznego oddawania dużej mocy potrzebnej np. do rozruchu silników głównych statków powietrznych czy zasilania systemów aktywnej ochrony. NATO w ramach projektów takich jak INDY wyznacza mapę drogową do roku 2050, zakładającą osiągnięcie neutralności klimatycznej obozów wojskowych i pełnej autonomii taktycznej dzięki hybrydyzacji źródeł zasilania i paliwom syntetycznym, np. pozyskiwanym z wody morskiej. Ostatecznie, przyszłość energii na polu walki to przejście od scentralizowanej logistyki paliwowej do rozproszonych, cichych i inteligentnych systemów, które zapewniają przewagę informacyjną i operacyjną w ekstremalnych warunkach konfliktów zbrojnych.

LITERATURA

1. Chmielarczyk K., Nowakowska-Krystman A. i Owczarczyk P. (2023) "AGREGATY ROZWOJU I WYKORZYSTANIA ENERGII NA POLU WALKI", Wiedza Obronna, 283(2).
2. Defence24 (2013). Napędzany wodorem bezzałogowiec latał ponad dwie doby, <https://defence24.pl/sily-zbrojne/napedzany-wodorem-bezzałogowiec-latal-ponad-dwie-doby> (dostęp: 24.03.2026).
3. Ekologia.pl. Powstanie ekologicznego superkondensatora, <https://www.ekologia.pl/srodowisko/powstanie-ekologiczny-superkondensator/> (dostęp: 29.03.2026).
4. Gębura A., Szelmanowski A. i Brzozowski M., 2024, Możliwości zastosowania systemów fotowoltaicznych w technologiach wojskowych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, s. 16-26.
5. JJ Energy Group. Elastyczne panele fotowoltaiczne, <https://jjenergygroup.pl/elastyczne-panele-fotowoltaiczne/> (dostęp: 29.03.2026).
6. Michalak S., Kowalczyk H., Gębura A. i Tokarski T., 2024, Przegląd ekologicznych militarnych i cywilnych systemów zasilania, Journal of KONBiN, Vol. 54, Issue 1, s. 33-46.
7. Okretypodwodne.edu.pl (2024). A może okręty podwodne z Niemiec dla MW RP. <https://okretypodwodne.edu.pl/a-moze-okrety-podwodne-z-niemiec-dla-mw-rp/> (dostęp: 29.03.2026).
8. Onet Wiadomości (2026). Globalny kryzys paliwowy dociera na ukraiński front – żołnierze mówią wprost o problemach, <https://wiadomosci.onet.pl/swiat/globalny-kryzys-paliwowy-dociera-na-ukrainski-front-zolnierze-mowia-wprost-o/v234fgz> (dostęp: 29.03.2026).
9. Pellowski W., Gonciarz A., Miedziak J., Bogdanowicz K.A., Krysiak P., Śliwakowski M., Szczepaniak M., Przybył W., Marzec M. i Iwan A., 2026, From SiGe Solidification to Flexible Photovoltaic Fibers for Military Applications: Current Status and Development Prospects, Energies, Vol. 19, nr art. 654, s. 1-36.
10. Politechnika Wroclawska (2020). Ogniwa paliwowe PEM, <https://wme-zl.pwr.edu.pl/wp-content/uploads/2020/01/4-ogniwa-paliwoweMTS-II.pdf> (dostęp: 29.03.2026).
11. Rękas M., OGNIWA PALIWOWE. WYKŁAD VI. https://home.agh.edu.pl/~radecka/doc/Ogniwa_SOFC.pdf (dostęp: 31.03.2026).
12. Thonon B., 2026, Energy Independent and Efficient Deployable Military Camps, Energy Highlights, nr 21, s. 6-14.

BATTLEFIELD ENERGY - INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Abstract

This article analyzes the importance of energy on the modern battlefield and the development of energy technologies. Modern solutions for energy generation, storage, and management are presented. The importance of energy for weapons, communications, and reconnaissance systems is discussed. Key development factors and directions for energy transformation in the national defense sector are identified. Particular attention is paid to the role of renewable energy sources in increasing energy security and the operational autonomy of the armed forces.

Keywords: renewable energy sources, battlefield, technologies, logistics

Michał CIAŁKOWSKI*
Bartosz CIUPEK*
Andrzej FRĄCKOWIAK*
Janusz ZMYWACZYK**
Tadeusz MIKUTEL***

ALGORYTM WYZNACZANIA OBCIĄŻENIA CIEPLNEGO LUFY W TRAKCIE SERYJNEGO ODDAWANIA STRZAŁÓW

W niniejszej pracy przedstawiono algorytm wyznaczania obciążenia cieplnego lufy podczas seryjnego oddawania strzałów, z uwzględnieniem zmiennych warunków wymiany ciepła oraz dynamiki ruchu pocisku. Wskazano, że nagrzewanie lufy może prowadzić do przemian fazowych materiału (feryt-austenit), co skutkuje jego zmęczeniem i skróceniem trwałości eksploatacyjnej. Model matematyczny oparto na nieliniowym równaniu przewodnictwa ciepła, rozwiązywanym metodami iteracyjnymi oraz z wykorzystaniem podstawienia Kirchhoffa. Szczególną uwagę poświęcono opisowi strumienia ciepła generowanego przez spalanie prochu. Zaproponowano efektywną metodę jego wyznaczania poprzez zastosowanie profilu bazowego korygowanego wektorem modyfikującym dla kolejnych strzałów, co eliminuje konieczność rozwijania funkcji w szereg Fouriera i znacząco redukuje czas obliczeń. W pracy przeanalizowano również różne modele prędkości pocisku w lufie: jedno- i dwuparametrowe funkcje wykładnicze oraz aproksymację funkcją sklejaną paraboliczno-kubiczną. Wykazano, że klasyczne modele nie spełniają warunku zerowego przyspieszenia na wylocie, co uzasadnia zastosowanie bardziej zaawansowanego opisu. Zaproponowany model zapewnia zgodność z warunkami kinematycznymi oraz lepsze odwzorowanie rzeczywistego przebiegu ruchu pocisku. Istotnym osiągnięciem pracy jest uwzględnienie zmienności strumienia ciepła w kolejnych strzałach wynikającej ze wzrostu temperatury lufy, co wpływa na intensywność wymiany ciepła. Opracowane podejście może być wykorzystane w analizach trwałości luf oraz optymalizacji parametrów strzelania.

Słowa kluczowe: lufa, temperatura, obciążenie cieplne

* Instytut Energetyki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki,
Politechnika Poznańska, Poznań

** Instytut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa,
Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

*** Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa

WYKAZ SKRÓTÓW

- T – temperatura, °C
- t – zmienna czasu, s
- t_k – czas przelotu pocisku przez lufę, s
- T_f – temperatura płynu, °C
- r – promień, m
- z – współrzędna osiowa, m
- Ω – obszar obliczeniowy,
- Γ – brzeg obszaru Ω ,
- N_q – liczba punktów profilu,
- N – liczba iteracji w procesie Newtona,
- {wektor_korr} – wektor korygujący strumień ciepła dla kolejnych strzałów.

1. WPROWADZENIE

Problematyka obciążeń cieplnych lufy w trakcie oddawania strzałów stanowi od wielu dekad istotny obszar badań, obejmujący zarówno modelowanie wymiany ciepła, jak i analizę trwałości materiałowej oraz procesów erozyjnych. W klasycznych opracowaniach wskazuje się, że głównym źródłem nagrzewania lufy są wysokotemperaturowe gazy prochowe oraz tarcie pocisku o przewód lufy, co prowadzi do intensywnego, niustalonego procesu przewodzenia ciepła i powstawania dużych gradientów temperatury [Shelton i in., 1973; Bergdolt, 1956]. Współczesne badania koncentrują się na numerycznym modelowaniu procesów cieplnych z wykorzystaniem metod elementów skończonych oraz zagadnień odwrotnych. Chen i in. (2007) zaproponowali metodę identyfikacji strumienia ciepła na podstawie pomiarów temperatury, co umożliwiła rekonstrukcję warunków brzegowych w lufach wielowarstwowych. Podobne podejście rozwinięto w pracach Chen i Liu (2008), gdzie zastosowano metodę elementów skończonych do estymacji niestacjonarnego strumienia ciepła w ujęciu dwuwymiarowym. Modele przejściowe (transient) nagrzewania luf podczas ognia seryjnego analizowali Hill i Conner (2012), wskazując na silną zależność temperatury od charakterystyki cyklu strzałów oraz warunków chłodzenia. Rozwinięciem tych badań są prace uwzględniające sprzężenie z balistyką wewnętrzną. Susantez i Caldeira (2022) opracowali szczegółowy model numeryczny dla działła gładkolufowego, łączący przepływ gazów z wymianą ciepła. Z kolei Abaci i in. (2022) przeprowadzili eksperymentalną walidację rozkładów temperatury lufy podczas wielokrotnych strzałów, wskazując na konieczność uwzględnienia zmienności warunków brzegowych. Istotny nurt badań dotyczy także zaawansowanych modeli przewodzenia ciepła, w tym modeli niefourierowskich (Mohapatra, 2015) oraz modeli DPL (Talaee i Hosseinli, 2019), które lepiej odwzorowują szybkie procesy cieplne w materiałach lufowych. W literaturze analizowane są również metody ograniczania

obciążeń cieplnych, m.in. poprzez chłodzenie aktywne i konstrukcje wielowarstwowe (Wu i in., 2008; Wu, 2005). Nowsze prace uwzględniają złożone mechanizmy generacji ciepła, takie jak tarcie, promieniowanie i oddziaływanie gaz–pocisk (Ge i in., 2025; Zhang i in., 2024). Podejmowane są również analizy zagrożeń eksploatacyjnych, takich jak cook-off (Telles i in., 2021) oraz metody predykcji trwałości luf (Zhang i in., 2023). Pomimo znacznego rozwoju metod numerycznych, większość dostępnych modeli zakłada powtarzalny lub niezmienny w czasie profil strumienia ciepła albo wykorzystuje rozwinięcia Fouriera do jego opisu. Prowadzi to do zwiększonej złożoności obliczeniowej oraz ograniczonej możliwości uwzględnienia zmian wynikających z nagrzewania się lufy w kolejnych strzałach.

W odróżnieniu od powyższych prac, w niniejszym artykule zaproponowano podejście umożliwiające bezpośrednie uwzględnienie zmienności strumienia ciepła w kolejnych cyklach strzałów poprzez zastosowanie wektora korekcyjnego względem profilu bazowego. Dodatkowo przedstawiono alternatywny opis ruchu pocisku, który zapewnia spełnienie warunków kinematycznych na wylocie z lufy. Pozwala to na bardziej efektywne obliczeniowo i fizycznie uzasadnione modelowanie obciążeń cieplnych lufy w warunkach ognia seryjnego. Obciążenia cieplne lufy w trakcie oddawania serii strzałów wywołać mogą w zależności od długości serii osiągnięcie w lufie punktu przemiany fazowej (feryt przechodzi w austenit), co powoduje lokalne kurczenie się materiału lufy [Zieliński 2023]. Cykliczność przejścia powrotnego powoduje procesy zmęczenia materiału lufy, co w efekcie końcowym powoduje jej pękanie i konieczność wymiany, a to podnosi koszt jej użytkowania. Zwiększenie trwałości lufy można osiągnąć przez stosowanie materiałów o zwiększonej odporności na ścieranie, żarowytrzymałych i żaroodpornych lub też wydłużając czas pomiędzy kolejnymi strzałami, co wymaga dodatkowych obliczeń.

Proces przekazywania ciepła od spalanego prochu wymaga określenia jego strumienia w czasie ruchu pocisku w lufie. Rozkład temperatury w ściance lufy, rys.1 , opisuje równanie przewodnictwa ciepła, którego postać jest następująca:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho(T) \cdot c(T)} \operatorname{div}(\lambda(T) \cdot \nabla T), \quad T = T(r, z, t), \quad t > 0, \quad (r, z) \in \Omega \quad (1)$$

gdzie parametry termofizyczne materiału lufy oznaczono przez:

ρ – gęstość (kg/m³),

c – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu (J/kg·K),

λ – przewodność cieplna (W/m·K).

Ze względu na nieliniowość równania (1) rozwiązanie można uzyskać stosując proces iteracyjny:

$$\frac{\partial T^{n+1}}{\partial t} = \frac{1}{\rho(T^n) \cdot c(T^n)} [\lambda(T) \cdot \nabla T^n \cdot \nabla T^{n+1} + \lambda(T^n) \cdot \Delta T^{n+1}], \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

z następującymi warunkami w obszarze Ω , rys.1

- warunek początkowy

$$T(r, z, 0) = T_0(r, z), \quad (r, z) \in \Omega \quad (3)$$

- warunek brzegowy

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_z} = \alpha_z (T - T_f) \quad (4)$$

- strumień ciepła na powierzchni wewnętrznej lufy

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_4} = q(t) \quad (5)$$

Na powierzchniach Γ_1, Γ_3 strumień ciepła przyjmuje się równy zero.

Drugą często stosowaną metodą rozwiązywania nieliniowego równania (1) jest wykorzystanie metody podstawienia Kirchhoffa, co prowadzi do liniowej formy prawej strony równania (1). Proces stosowania tej metody wyraża się ciągiem przekształceń, przez wprowadzenie podstawienia:

$$\vartheta = \int_{T_0}^T \lambda(u) du \quad (6)$$

dla $T_0 = \text{const.}$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda(T_0) \frac{\partial T_0}{\partial t} = \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial t},$$

$$\text{div } \vartheta = \lambda(T) \cdot \text{div } T - \lambda(T_0) \cdot \text{div } T_0 = \lambda(T) \cdot \text{div } T, T_0 = \text{const.}$$

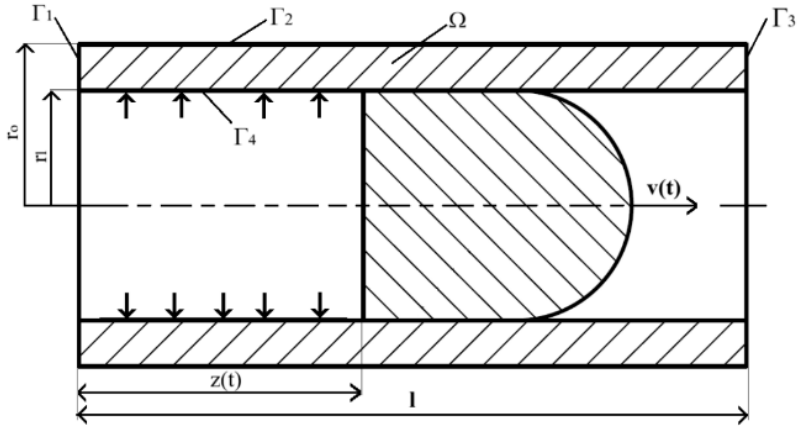
Zatem równanie (1) przyjmuje postać:

$$\frac{\rho(T(\vartheta)) \cdot c(T(\vartheta))}{\lambda(T(\vartheta))} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \Delta \vartheta \rightarrow f(\vartheta) \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \Delta \vartheta, \quad (7)$$

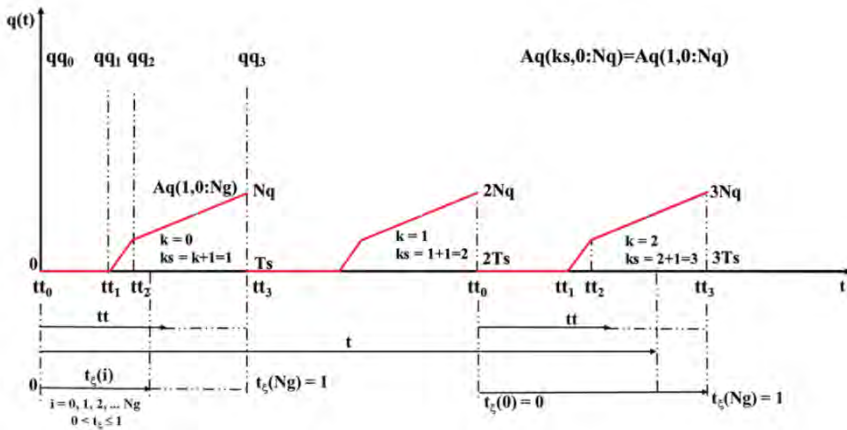
gdzie:

$$f(\vartheta) = \frac{\rho(T(\vartheta)) \cdot c(T(\vartheta))}{\lambda(T(\vartheta))}.$$

Rozwiązanie nieliniowego równania (7) można uzyskać przez zastosowanie analogicznego procesu iteracyjnego jak w (2). Na rys. 1 przedstawiono obszar obliczeniowy do wyznaczania przebiegu prędkości i strumienia ciepła w lufie. Na odcinku $\langle 0, z(t) \rangle$ brzegu Γ_4 następuje intensywne przekazywanie ciepła od spalanego gazu prochowego.



Rys. 1. Oszar obliczeniowy Ω [oprac. własne]



Rys. 2. Przykładowy profil strumienia ciepła $q(t)$ na powierzchni wewnętrznej lufy [oprac. własne]

gdzie:

T_s – czas ruchu pocisku w lufie,

$k = \left\lfloor \frac{t}{T_s} \right\rfloor$, $k_s = k + 1$ – numer strzału,

t – czas wydzielania strumienia ciepła $q(t)$,

$z(t): t - k \cdot T_s$ – położenie w czasie miejsca wydzielania strumienia ciepła,

$t \in \langle k \cdot T_s, (k + 1) \cdot T_s \rangle$,

$t_\xi = \frac{t - k \cdot T_s}{(k + 1) \cdot T_s - k \cdot T_s} = \frac{t - k \cdot T_s}{T_s}$ – bezwymiarowy czas,

tt_0, tt_1, tt_2, tt_3 – charakterystyczne punkty czasowe profilu strumienia ciepła.

Odległość czasowa pomiędzy kolejnymi strzałami wynosi $tt_1 - tt_0$. Macierz $Aq(ks, 0:Ng)$, gdzie ks jest numerem strzału, zaś wiersz $\{0:Ng\}$ zawiera niezerowe elementy strumienia ciepła. Na odcinku $\langle tt_0, tt_1 \rangle$ strumień ciepła ma wartość zerową.

Na rys. 3 pokazano liniowe przybliżenie strumienia ciepła w kolejnych powtarzających się strzałach o okresie T_s . Jeśli w kolejnych strzałach profil strumienia ciepła jest identyczny, to funkcję $q(t)$ można rozwinąć w szereg Fouriera, zależności (8)-(8.3). Jednakże w każdym kolejnym strzale profil $q(t)$ ulega zmianie, gdyż nagrzewająca się ściana wewnętrzna lufy odbiera zmniejszającą się ilość ciepła. Fakt ten można uwzględnić zakładając inny profil funkcji $q(t)$ wyrażonej przez kolejne elementy macierzy: $Aq(ks, j) = Aq(ks, j) \cdot \text{wektor_korr}(j)$, $j=0, Nq$.

Opierając się na profilu podstawowym, którego korygując wektorem $\{\text{wektor_korr}\}$ zmienia się cyklicznie kształt strumienia ciepła $q(t)$. Uwzględnienie tego faktu pozwala całkowicie na uniknięcie sumowania szeregu Fouriera celem wyznaczenia przebiegu strumienia ciepła $q(t)$. Dla oszacowania rzędu oszczędności czasu obliczeń wartości strumienia ciepła przez rozwinięcie strumienia ciepła w szereg Fouriera porównajmy czasy obliczeń dla funkcji liniowej $q(t) = t$ i jej rozwinięcia w szereg Fouriera. Dla przykładowego profilu strumienia ciepła z rys. 3 występują odcinki prostej. Dla celów porównawczych przyjęto, że w całym przedziale $\langle 0, T_s \rangle$ funkcja $q(t)$ jest funkcją liniową. Funkcja strumienia ciepła $q(t)$, dla wielu strzałów, jest funkcją okresową, co w sposób naturalny narzuca do jej opisu rozwinięcie jej w szereg Fouriera.

Dla zadanego profilu strumienia ciepła $q(t)$ wynikającego ze spalania prochu obliczanie cyklicznego strumienia ciepła w dowolnej chwili wymaga zastosowania rozwinięcia przebiegu podstawowego (dla jednego strzału) w szereg Fouriera.

Zauważmy, że każdą funkcję różniczkowalną można przedstawić w postaci rozwinięcia w szereg potęgowy $q(t) = q_0 + q_1 \cdot t + q_2 \cdot t^2 + q_3 \cdot t^3 \dots$. Występowanie części liniowej prowadzi w szeregu Fouriera do wyrazu $\frac{1}{n}$, $n = 1, 2, 3, \dots$, przeto potrzeba dużej liczby kolejnych wyrazów, aby osiągnąć wystarczającą dokładność przedstawienia funkcji $q(t)$ w postaci szeregu Fouriera (8).

$$q(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cdot \cos \frac{2n \cdot \pi \cdot t}{T} + b_n \cdot \sin \frac{2n \cdot \pi \cdot t}{T} \right), T = b - a \quad (8)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \cdot \int_a^b f(t) \cdot dt, \quad (9)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_a^b f(t) \cdot \cos \frac{2n \cdot \pi \cdot t}{T} dt, = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_a^b f(t) \cdot \sin \frac{2n \cdot \pi \cdot t}{T} dt, = 1, 2, 3, \dots, T = T_s \quad (11)$$

Postać rozwinięcia funkcji liniowej w szereg Fouriera jest następująca:

$$q_{approx}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin 2\pi n(1-t)}{n} + \frac{\cos 2\pi n(1-t)}{2\pi n^2} - \frac{1}{2\pi n^2} \right], \quad t \in \langle 0,1 \rangle \quad (12)$$

$$q_{approx}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin 2\pi n(1-t)}{n} \right], \quad t \in \langle 0,1 \rangle$$

Uwaga! Rozwinięcie funkcji $q(t) = t$ w szereg Fouriera w przedziale $(0, 1)$ nie zawiera pod znakiem sumy wyrazów $\frac{\cos 2\pi n(1-t)}{2\pi n^2} - \frac{1}{2\pi n^2}$.

Błąd przybliżenia funkcji $q(t) = t$ przez funkcję $q_{approx}(t)$ będącą rozwinięciem funkcji $q(t)=t$ w szereg Fouriera:

$$\begin{aligned} \|q(t) - q_{approx}(t)\| &= \sqrt{\int_0^1 [q(t) - q_{approx}(t)]^2 dt} = \sqrt{\int_0^1 f^2(t) dt}, \\ f(t) &= q(t) - q_{approx}(t) \end{aligned} \quad (13)$$

Wyrażając funkcję $f(t)$ w przedziale $\langle t_i, t_{i+1} \rangle$ jako funkcję liniową:

$$f(t) = a_i t + b_i = \frac{f_i - f_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} \cdot t + \frac{f_{i+1} \cdot t_i - f_i \cdot t_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} \quad (14)$$

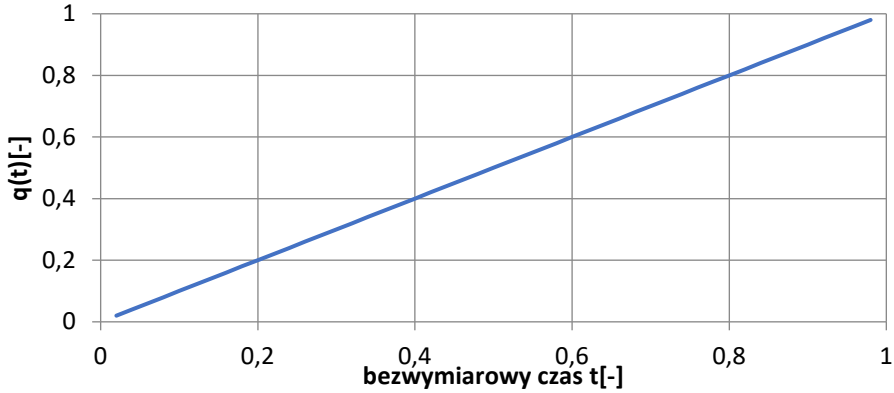
wtedy

$$\begin{aligned} \|q(t) - q_{approx}(t)\|^2 &= \sum_{i=1}^{Nq-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} (a_i t + b_i)^2 dt = \sum_{i=1}^{Nq-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} (a_i^2 t^2 + 2a_i \cdot \\ &\cdot b_i \cdot t + b_i^2) dt = \sum_{i=1}^{Nq-1} \left(\frac{a_i^2}{3} t^3 + a_i b_i t^2 + b_i^2 \cdot t \right)_{t_i}^{t_{i+1}} \end{aligned} \quad (15)$$

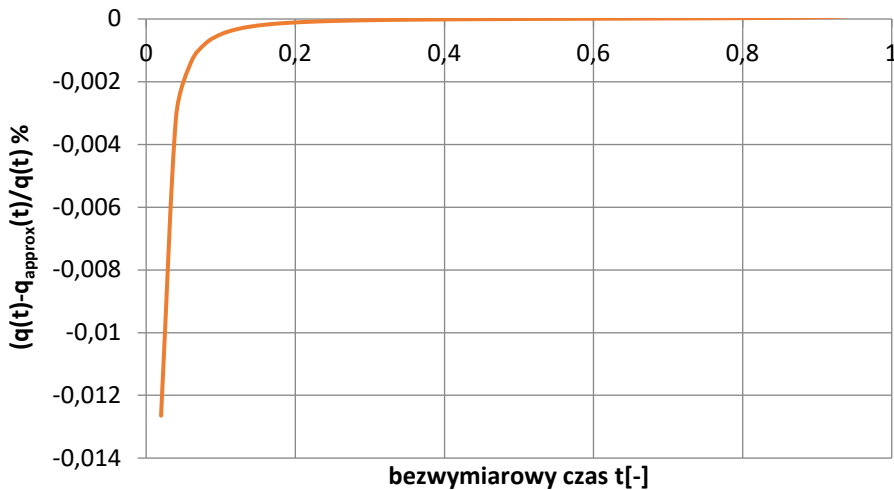
stąd:

$$\|q(t) - q_{approx}(t)\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{Nq-1} \left(\frac{a_i^2}{3} (t_{i+1}^3 - t_i^3) + a_i b_i (t_{i+1}^2 - t_i^2) + b_i^2 \cdot (t_{i+1} - t_i) \right)} \quad (16)$$

Na rys. 3 przedstawiono porównanie przebiegu strumienia $q(t)$ w postaci analitycznej i przybliżonej strumienia ciepła szeregiem Fouriera dla podziału osi czasu na $Nq=75$ przedziałów.



Rys. 3. Przebieg strumienia $q(t)$ w postaci analitycznej i przybliżonej strumienia ciepła szeregiem Fouriera dla podziału osi czasu na $Nq=75$ podprzedziałów. Ze względu na niewielkie różnice rys. 4, krzywe $q(t)$ i $q_{\text{approx}}(t)$ pokrywają się [oprac. własne]



Rys. 4. Względny błąd procentowy $100 \cdot (q(t) - q_{\text{approx}}(t)) / q(t)$ [oprac. własne]

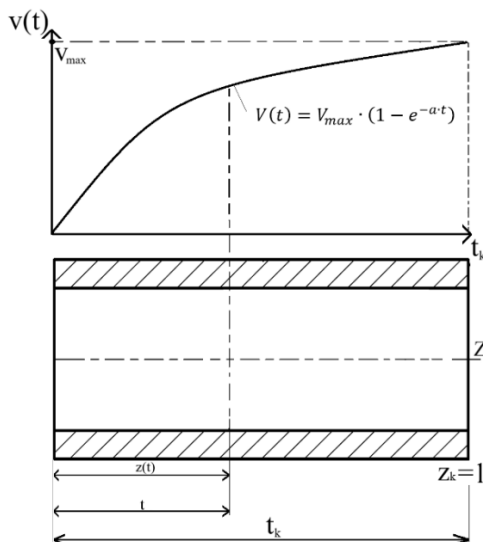
Błąd w normie $\|q_{\text{dokl}} - q_{\text{approx}}\| = 0,5E-06$.

Stosunek czasów wyznaczania wartości strumienia $q(t)$ z szeregu Fouriera i liniowej funkcji $q(t)$ wynosi: $t_{\text{Fourier}}/t = 0,4E+07$. Ponadto wyliczanie zmiennej wartości strumienia ciepła w kolejnych cyklach jest bardzo efektywne przez zastosowanie wektora korekcyjnego względem profilu podstawowego wyrażonego macierzą $[Aq]$, $Aq(ks,j) = Aq(ks,j) \cdot \text{wektor_korr}(j)$, $j=0, Nq$. Oszacowanie konkretnej postaci wektora korygującego zależy od geometrii lufy i rodzaju pocisku i wynika z badań eksperymentalnych. Zatem dla każdego kolejnego strzału wektor korygujący

jest inny. W rozwinięciu funkcji strumienia ciepła w szereg Fouriera strumień ciepła $q(t)$ ma taki sam przebieg.

1.1. Profil prędkości pocisku – opis funkcją jednoparametrową

Na rys. 5 przedstawiono przybliżony charakter prędkości pocisku w lufie według funkcji eksponencjalnej.



Rys. 5. Przykładowy profil prędkości pocisku w lufie według funkcji jednoparametrowej [oprac. własne]

Dla założonego profilu prędkości pocisku w lufie:

$$V(t) = V_{max} \cdot (1 - e^{-a \cdot t}), \quad t \in \langle 0, t_k \rangle, \quad a > 0 \quad (17)$$

nieznany parametr a wyznaczamy z zależności drogi $z(t)$ od prędkości:

$$dz(t) = V(t) \quad (18)$$

a po scałkowaniu w granicach $\langle 0, t \rangle$:

$$\int_0^t dz(t) = \int_0^t V_{max} \cdot (1 - e^{-a \cdot t}) dt \quad (19)$$

$$z(t) - z(0) = V_{max} \cdot \left(t + \frac{1}{a} e^{-a \cdot t} \right) \quad (20)$$

$$z(t) - z(0) = V_{max} \cdot \left(t + \frac{1}{a} \exp(-a \cdot t) - \frac{1}{a} \right) = V_{max} \cdot \left(t - \frac{1 - \exp(-at)}{a} \right) \quad (21)$$

więc dla $z(0) = 0$ oraz dla $t = t_k$: $z(t_k) = Z_k$ (Z_k jest długością lufy) otrzymujemy zależność na określenie nieznanego parametru a w postaci:

$$Z_k = V_{max} \cdot \left[t_k - \frac{1 - \exp(-a \cdot t_k)}{a} \right] \rightarrow \frac{Z_k}{V_{max} \cdot t_k} = 1 - \frac{1 - \exp(-\eta_k)}{\eta_k}, \quad \eta_k = a \cdot t_k \quad (22)$$

lub:

$$w = \frac{Z_k}{V_{max} \cdot t_k} = f(\eta_k) = 1 - \frac{1 - \exp(-\eta_k)}{\eta_k} \rightarrow 1, \text{ dla } \eta_k \rightarrow \infty \quad (23)$$

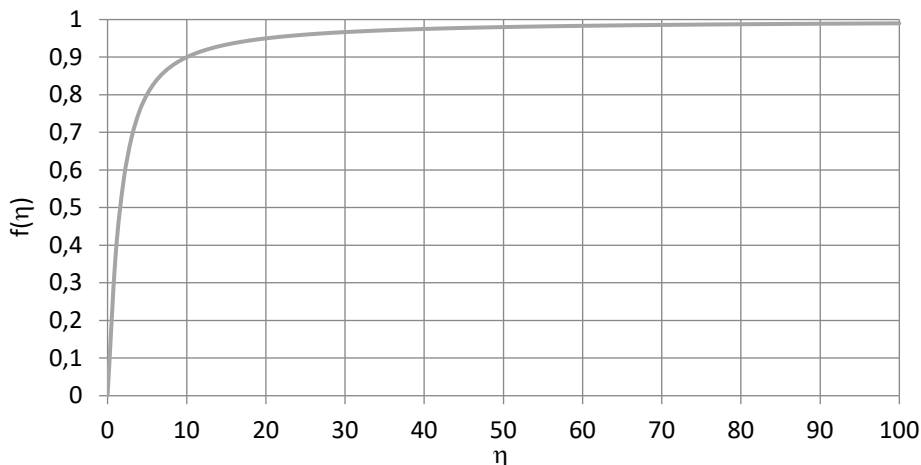
zaś dla $\eta_k \rightarrow 0$ mamy:

$$1 - \exp(-\eta_k) = 1 - \left(1 - \eta_k + \frac{\eta_k^2}{2} - \frac{\eta_k^3}{6} + \dots \right) = \eta_k - \frac{\eta_k^2}{2} + \frac{\eta_k^3}{6} - \dots \quad (24)$$

stąd:

$$\frac{1 - \exp(-\eta_k)}{\eta_k} \rightarrow 0, \text{ dla } \eta_k \rightarrow 0 \quad (25)$$

Przebieg funkcji $y(\eta_k)$ ilustruje rysunek (6).



Rys. 6. Przebieg funkcji $f(\eta) = 1 - (1 - \exp(-\eta))/\eta$ [oprac. własne]

Położmy $w = \frac{Z_k}{V_{max} \cdot t_k}$ wówczas z powyższej równości (23) miejsce zerowe η_k , spełnia równanie:

$$g(\eta_k) = w - 1 + \frac{1 - \exp(-\eta_k)}{\eta_k} = 0, \quad w = \frac{Z_k}{V_{max} \cdot t_k} \quad (26)$$

które rozwiązać można metodą Newtona. Niech $x = \eta_k$ wówczas poszukiwanie wartości x wynika ze zbieżności metody Newtona według schematu:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{g(x_n)}{g'(x_n)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (27)$$

$$g(x_n) = w - 1 + \frac{1 - \exp(-x_n)}{x_n} \quad (28)$$

$$g'(x_n) = \left(\frac{1 - \exp(-x_n)}{x_n} \right)' = \frac{(1+x_n)\exp(-x_n) - 1}{x_n^2} \quad (29)$$

Pierwsze przybliżenie x_0 równania uzyskujemy rozwijając funkcję $g(x)$ w szereg Taylora.

$$g(x) = w - 1 + \frac{1 - \left(1 - x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \dots\right)}{x} = w - 1 + 1 - \frac{x}{2} + \frac{x^2}{6} + \dots \approx 0 \quad (30)$$

stąd:

$$\frac{x^2}{6} - \frac{x}{2} + w \approx 0 \quad (31)$$

Pomijając część kwadratową otrzymamy:

$$\frac{x}{2} = w \rightarrow x_0 = 2w \quad (32)$$

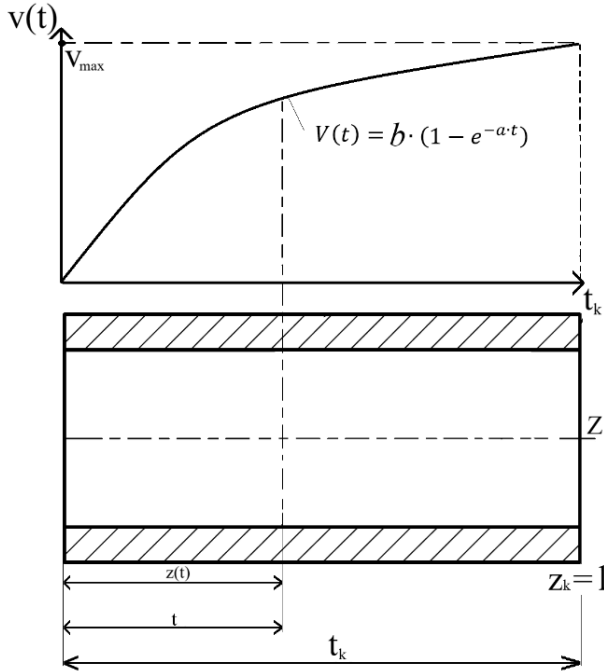
i dla $z_k = 0,406 \text{ m}$, $t_k = 0,001 \text{ s}$, $V_{max} = 100 \text{ m/s}$

$$w = \frac{Z_k}{V_{max} \cdot t_k} = \frac{0,406}{100 \cdot 0,004} = \frac{0,406}{0,4} \approx 1, \quad x_0 = 2w = 2 \quad (33)$$

Zauważmy, że dla $w > 1$ funkcja $g(\eta_k) > 0$ i wówczas metoda Newtona nie jest zbieżna. Zbieżność metody Newtona zależy od $w = \frac{Z_k}{V_{max} \cdot t_k} < 1$.

1.2. Profil prędkości pocisku – opis funkcją dwuparametrową

Na poniższym rysunku przedstawiono schematycznie profil prędkości $v(t)$ wyrażony funkcją exponentialną z dwoma nieznanymi parametrami a i b w postaci (30)



Rys. 7. Przykładowy profil prędkości pocisku w lufie według funkcji dwuparametrowej [oprac. własne]

$$V(t) = b \cdot (1 - e^{-a \cdot t}), \quad t \in (0, t_k), \quad a > 0 \quad (34)$$

$$dz(t) = V(t) \cdot dt \Big|_0^t \quad (35)$$

$$z(t) - z(0) = \int_0^t b \cdot (1 - e^{-at}) \cdot dt = b \left(t + \frac{1}{a} e^{-at} \right) \Big|_0^t = b \left(t + \frac{e^{-at}}{a} - \frac{1}{a} \right) \quad (36)$$

Dla $t = t_k$, $z(t_k) = z_k$

$$z_k = b \left(t_k + \frac{e^{-at_k}}{a} - \frac{1}{a} \right) \quad (37)$$

oraz

$$V(t_k) = v_k = b(1 - e^{-at_k}) \quad (38)$$

stąd

$$b = \frac{v_k}{1 - \exp(-at_k)} = \frac{v_k}{1 - \exp(-\eta_k)}, \quad \eta_k = at_k \quad (39)$$

Dzieląc stronami (37) i (38) otrzymujemy:

$$w = \frac{Z_k}{V_k \cdot t_k} = \frac{1}{1 - \exp(-\eta_k)} - \frac{1}{\eta_k} \quad (40)$$

Dla zadanych wartości Z_k , V_k , t_k poszukujemy z powyższego równania parametr η_k spełniający równość:

$$g(\eta_k) = \frac{Z_k}{V_k \cdot t_k} = \frac{1}{1 - \exp(-\eta_k)} + \frac{1}{\eta_k} = 0 \quad (41)$$

co stanowi równanie nieliniowe i stosując metodę Newtona należy wyznaczyć pierwszą pochodną $g'(\eta_k)$, mianowicie:

$$g'(\eta_k) = \frac{\exp(-\eta_k)}{(1 - \exp(-\eta_k))^2} - \frac{1}{\eta_k^2} \quad (42)$$

Stąd proces iteracyjny według metody Newtona jest następujący:

$$(\eta_k)_{n+1} = (\eta_k)_n - \frac{g((\eta_k)_n)}{g'((\eta_k)_n)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (43)$$

gdzie $(\eta_k)_0$ stanowi pierwsze przybliżenie rozwiązania równania (41), które wyznaczamy z równania (41) rozwijając funkcję $\exp(-\eta_k)$ w szereg Taylora z pominięciem członów wyższego rzędu:

$$1 - \exp(-\eta_k) = 1 - \left(1 - \eta_k + \frac{\eta_k^2}{2} - \dots\right) = \eta_k - \frac{\eta_k^2}{2} + \dots \quad (44)$$

$$g(\eta_k) = \frac{Z_k}{V_k \cdot t_k} = \frac{1}{\eta_k - \frac{\eta_k^2}{2} + \dots} + \frac{1}{\eta_k} \approx 0 \rightarrow w + \frac{-\eta_k + \eta_k - \frac{\eta_k^2}{2}}{\eta_k - \frac{\eta_k^2}{2}} = w + \frac{1 - \frac{\eta_k}{2}}{\eta_k - \frac{\eta_k^2}{2}} \approx 0 \quad (45)$$

stąd

$$w \cdot \left(\eta_k - \frac{\eta_k^2}{2}\right) + 1 - \frac{\eta_k}{2} \approx 0 \quad (46)$$

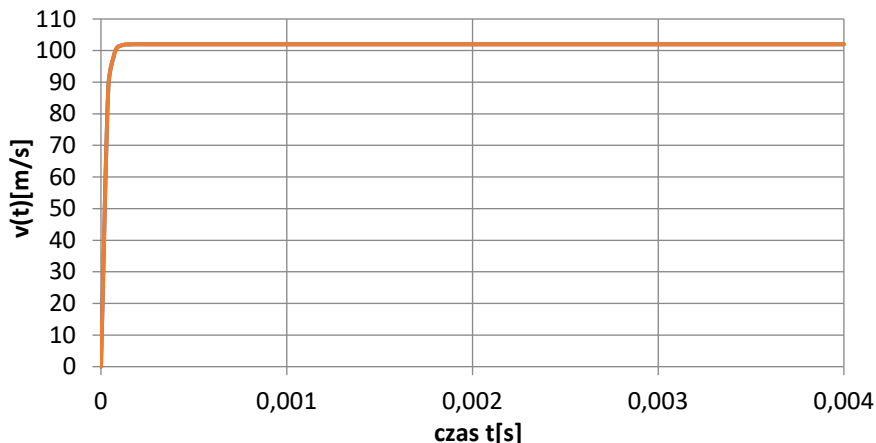
$$-\frac{w}{2} \cdot \eta_k^2 + \left(w - \frac{1}{2}\right) \cdot \eta_k + 1 = 0 \rightarrow \Delta = \left(w + \frac{1}{2}\right)^2 \quad (47)$$

$$(\eta_k)_1 = \frac{-\left(w - \frac{1}{2}\right) + w + \frac{1}{2}}{-w} = \frac{1}{-w} \quad (48)$$

$$(\eta_k)_2 = \frac{-\left(w - \frac{1}{2}\right) - \left(w + \frac{1}{2}\right)}{-w} = \frac{-2w}{-w} = 2 \quad (49)$$

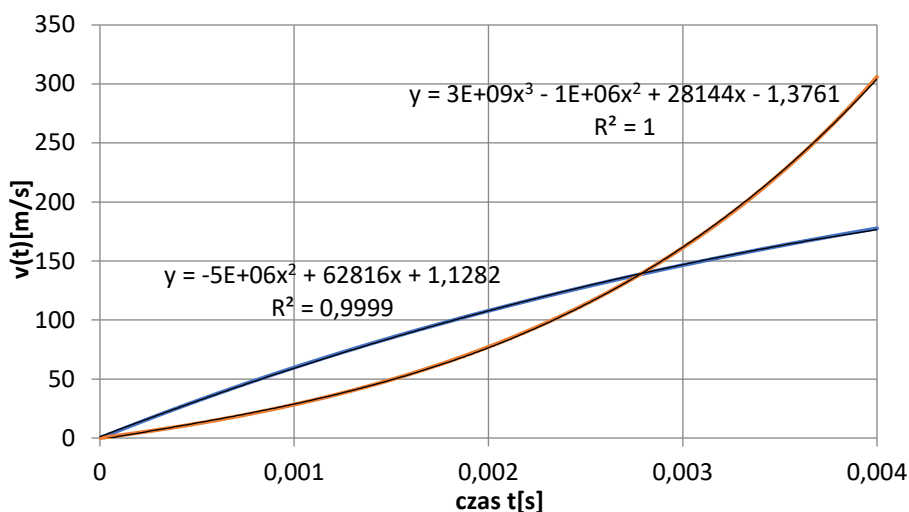
i ze względu na $\eta_k > 0$ pierwsze przybliżenie $(\eta_k)_0 = (\eta_k)_2 = 2$.

2. PORÓWNANIE PRĘDKOŚCI POCISKU W LUFIE WEDŁUG METODY JEDNO- I DWUPARAMETROWEJ



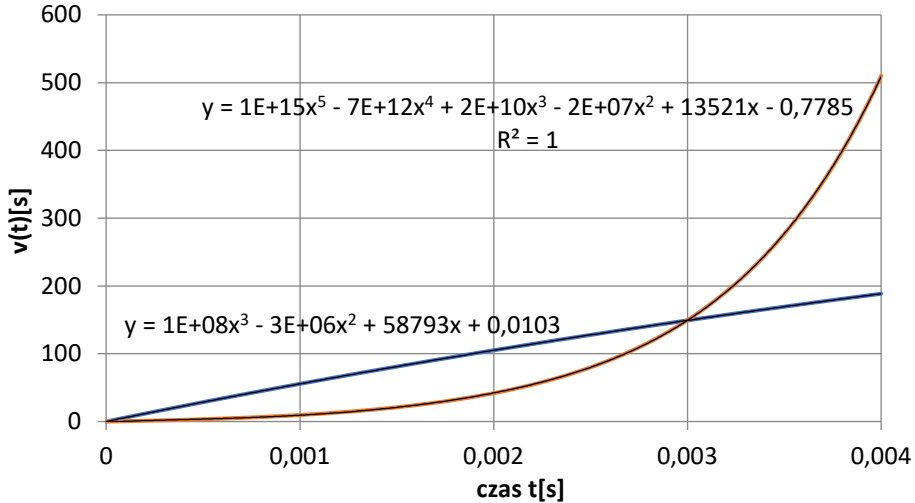
Rys. 8. Prędkość wylotowa pocisku $v_{\max} = 102$ [m/s] [oprac. własne]

Określenie strumienia ciepła na powierzchni wewnętrznej lufy zależy od profilu prędkości uwzględniającego osiągnięcie prędkości pocisku na wylocie z lufy. Na kolejnej serii dla różnych prędkości wylotowej pocisku rozważono dwie postacie profilu prędkości $v(t)$ w lufie. Dla danych przyjętych geometrycznych lufy minimalna prędkość v wylotowa jest równa 101.5 [m/s] zapewniająca zbieżność metody Newtona. Zauważmy, że dla dużych prędkości v_{\max} profile prędkości według metody jedno- i dwuparametrowej istotnie się różnią a ponadto przyspieszenie pocisku na wylocie z lufy powinno być w przybliżeniu równe zero.



Rys. 9. Prędkość wylotowa pocisku $v_{\max} = 306$ [m/s] [oprac. własne]

Górna linia na rys. 9 i 10 odpowiada funkcji dwuparametrowej prędkości z $v(t_k) = v_{\max}$.

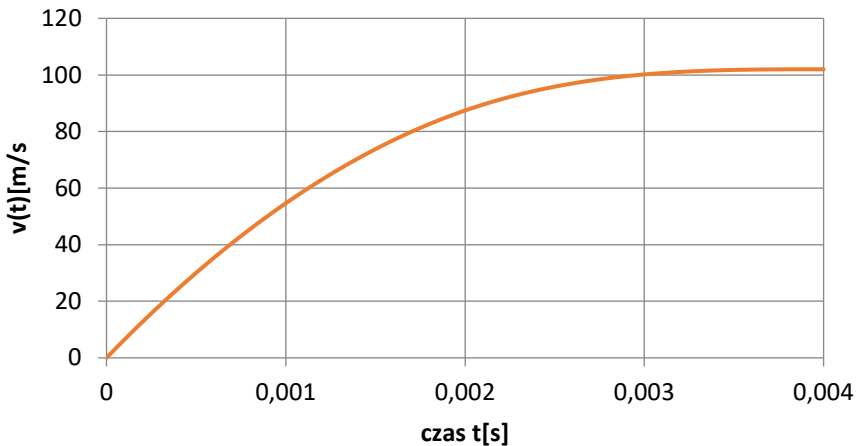


Rys. 10. Prędkość wylotowa pocisku $v_{\max} = 510$ [m/s] [oprac. własne]

Uwzględnienie zerowego przyspieszenia na wylocie z lufy opisuje zastosowanie aproksymacji profilu $v(t)$ funkcją dwusklejaną paraboliczno-kubiczną, rys. 11, mianowicie dla:

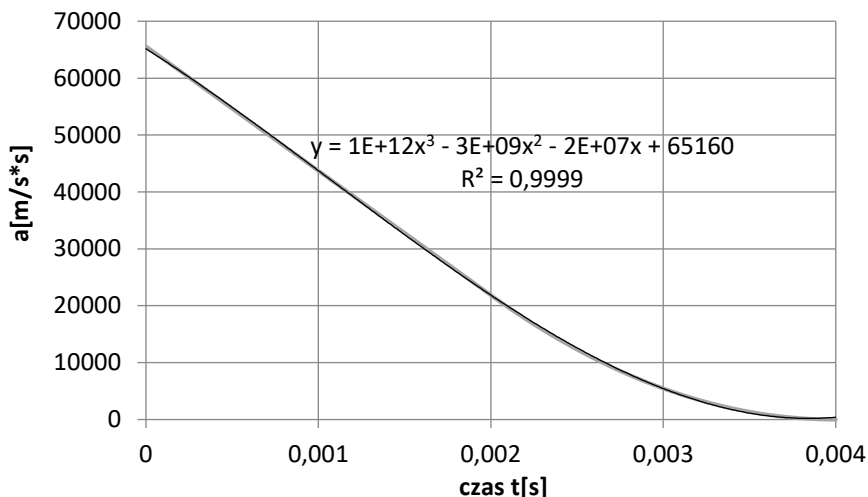
$$\xi = t/t_k, \text{ wielomian_paraboliczny} = 262.285714 * \xi - 174.857143 * \xi * \xi \text{ dla } \xi \leq \xi_p$$

$$\text{Wielomian kubiczny} = -14.571429 + 349.714286 * \xi - 349.714286 * \xi * \xi + 116.571429 * \xi * \xi * \xi \text{ dla } \xi > \xi_p. \text{ W obliczeniach przyjęto } \xi_p = 0.5.$$



Rys. 11. Paraboliczno-kubiczny profil prędkości dla $v_{\max} = 102$ [m/s] [oprac. własne]

Na rysunku (12) przedstawiono przebieg przyspieszenia pocisku jako paraboliczno-kubicznym profil prędkości.



Rys. 12. Profil przyspieszenia odpowiadający warunkowi jego zerowania się przyspieszenia na wylocie z lufy odpowiada czasowi $t = t_k = 0.004$ [s]

3. WNIOSKI

W pracy analizowano wpływ przebiegu profilu prędkości w lufie według różnych funkcji (metoda jedno- i dwuparametrowa, metoda funkcji sklejaných). W dwóch pierwszych metodach nie uzyskano zerowej wartości przyspieszenia pocisku w chwili wylotu z lufy (czas $t = t_k$) co stało się impulsem do poszukiwania innej formy zależności dla prędkości spełniającej warunki: $v(t_k) = v_{\max}$ i $v'(t_k) = 0$. Podano przykład takiej funkcji, która jest funkcją dwusklejaną paraboliczno-kubiczną (paraboliczna w początkowym przedziale czasu). Na podstawie badań eksperymentalnych ustalenie funkcji prędkości dla szeregu zbiorów parametrów geometrycznych z zachowaniem warunków kinematycznych dostarcza rzeczywistego przebiegu funkcji $v(t)$.

Istotną nowością pracy jest pokazanie możliwości korygowania strumienia ciepła na powierzchni wewnętrznej lufy dla kolejnych strzałów, rys. 2. Wynika to z faktu, że każdy kolejny strzał nie dostarcza tego samego strumienia ciepła co jest efektem wzrastającej temperatury powierzchni wewnętrznej po przejściu naboju (różnica temperatury gazów i powierzchni wewnętrznej lufy zmniejsza się).

Zatem ustalenie wektora modyfikującego kolejne strumienia ciepła można uzyskać z badań symulacyjnych na przykład w pakiecie FreeFEM. Podejście przed-

stawione na rys. 2 powoduje, że w przypadku niezmiennego strumienia ciepła $q(t)$ nie ma potrzeby rozwijania cyklicznej funkcji $q(t)$ w szereg Fouriera co istotnie wydłuża czas wyznaczenia wartości funkcji $q(t)$. Stanowi to drugie oryginalne osiągnięcie.

LITERATURA

Pozycje książkowe, prace doktorskie

1. Beck J.V., Blackwell B., St.Clair C. R., 1985, Inverse Heat Conduction Ill-Posed Problems, Wiley, New York.
2. Bergdolt V.E., 1956, The Design of Gun Barrels, praca doktorska, ProQuest.
3. Mohapatra J., 2015, Non Fourier Heat Transfer Across A Gun Barrel, praca doktorska, National Institute of Technology Rourkela.
4. Shelton S., Bergles A., Saha P., 1973, Study of Heat Transfer and Erosion in Gun Barrels, raport techniczny.
5. Taler J., 1995, Teoria i praktyka identyfikacji procesów przepływu ciepła, Zakład Narodowy imienia Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław Warszawa Kraków.
6. Zieliński M., Badania właściwości termofizycznych stali lufowych oraz symulacje numeryczne wymiany ciepła w lufie armaty wykonanej z tych stali, Rozprawa Doktorska, WAT, Warszawa, 2023

Artykuły w czasopismach

1. Abaci W.B., Hristov N., Ahmed N.Z., Jerkovic D., 2022, Determination of the gun barrel walls temperature distribution and its experimental validation during multiple-shots firing process, International Journal of Thermal Sciences.
2. Chen T.C., Liu C.C., Jang H.Y., Tuan P.C., 2007, Inverse estimation of heat flux and temperature in multi-layer gun barrel, International Journal of Heat and Mass Transfer.
3. Chen T.C., Liu C.C., 2008, Inverse estimation of time-varied heat flux and temperature on 2-D gun barrel using input estimation method with finite-element scheme, Defence Science Journal.
4. Frąckowiak A., Spura D., Gampe U., Ciałkowski M., 2020, Determination of heat transfer coefficient in a T-shaped cavity by means of solving the inverse heat conduction problem, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, nr 30(4), s. 1725 – 1742.
5. Ge Z., Zhou K., Lu Y., Ren H., 2025, Investigation of bore temperature evolution induced by friction, propellant gas, and projectile jacket materials during the firing process, Case Studies in Thermal Engineering.
6. Hill R.D., Conner J.M., 2012, Transient heat transfer model of machine gun barrels, Materials and Manufacturing Processes.
7. Joachimiak M., Joachimiak D., Ciałkowski M., 2022, Investigation on thermal loads in steady-state conditions with the use of the solution to the inverse problem, Heat Transfer Engineering, nr 44(11-12), s. 963-969.
8. Susantez C., Caldeira A.B., 2022, Heat transfer modelling and simulation of a 120 mm smoothbore gun barrel during interior ballistics, Defence Science Journal.

9. Talaee M.R., Hosseinli S.A., 2019, Theoretical simulation of temperature distribution in a gun barrel based on the DPL model, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*.
10. Telles R.M.G., Neto F.S., Guedes R.O.C., Loiola B.R., 2021, Cook-off evaluation in gun barrels through a transient heat transfer analysis, *materiały konferencyjne*.
11. Wang C., Wang M., Wang Z., 2023, Heat transfer analysis of barrel during continuous firing of small caliber artillery based on inverse heat conduction problem, *Proceedings of SPIE*.
12. Wu B., Chen G., Xia W., 2008, Heat transfer in a 155 mm compound gun barrel with full length integral midwall cooling channels, *Applied Thermal Engineering*.
13. Wu B., 2005, Barrel cooling: a key technology for improving gun performance, *Journal of Battlefield Technology*.
14. Zhang L.K., Wang K., Pan G.H., 2023, A review on life prediction methods of gun barrel, *Journal of Physics: Conference Series*.
15. Zhang Y., Xue T., Zhang X., 2024, Investigation of heat transfer in cracked gun barrels, *International Journal of Thermal Sciences*.

ALGORITHM FOR DETERMINING THERMAL LOAD OF THE BARREL DURING SERIAL FIRE

Abstract

This paper presents an algorithm for determining the thermal load on a barrel during serial shots, taking into account variable heat transfer conditions and projectile dynamics. It is demonstrated that barrel heating can lead to phase transformations of the material (ferrite–austenite), resulting in fatigue and reduced service life. The mathematical model is based on a nonlinear heat conduction equation, solved using iterative methods and Kirchhoff's substitution. Particular attention is paid to the description of the heat flux generated by gunpowder combustion. An effective method for determining this heat flux is proposed by using a base profile corrected by a modifying vector for subsequent shots, eliminating the need for Fourier series expansion and significantly reducing computational time. The paper also analyzes various models of projectile velocity in the barrel: single- and two-parameter exponential functions and a parabolic-cubic spline approximation. It is demonstrated that classical models do not satisfy the zero muzzle acceleration condition, justifying the use of a more advanced description. The proposed model ensures compliance with kinematic conditions and better representation of the actual projectile motion. A significant achievement of this work is the inclusion of heat flux variations in subsequent shots resulting from barrel temperature increases, which influence the heat transfer rate. The developed approach can be used in barrel durability analyses and the optimization of firing parameters.

Keywords: barrel, temperature, heat load

Jan DZIEDZIC*

CZYSTA ENERGIA DETERMINANTEM TRANSFORMACJI, EFEKTYWNOŚCI I ODPORNOŚCI ŁAŃCUCHÓW DOSTAW

„Adaptacja przestaje być już zaletą, staje się warunkiem przetrwania”.

Daniel P. Driscoll, US Secretary of the Army

„Odporność łańcuchów dostaw to dziś broń masowego przetrwania”

*gen broni dr Andrzej Falkowski, między innymi, były Zastępca Szefa Sztabu
Generalnego WP*

Transformacja energetyczna stanowi jeden z kluczowych mega trendów kształtujących współczesne łańcuchy dostaw. Rosnąca presja regulacyjna, oczekiwania interesariuszy oraz konieczność redukcji emisji gazów cieplarnianych powodują, że czysta energia staje się strategicznym zasobem przedsiębiorstw. W artykule przedstawiono analizę roli odnawialnych i niskoemisyjnych źródeł energii w procesie dekarbonizacji łańcuchów dostaw oraz ocenę ich wpływu na efektywność kosztową i odporność operacyjną. W opracowaniu wykorzystano analizę literatury oraz przegląd praktyk wdrażanych w sektorze logistycznym i przemysłowym. Rezultaty przeprowadzonej analizy wskazują, że integracja czystej energii z procesami logistycznymi oddziałuje na łańcuchy dostaw w trzech wymiarach: ekonomicznym - zwiększa stabilność kosztów, środowiskowym - redukcja emisji oraz strategicznym - zwiększa odporność na szoki energetyczne. Wykorzystanie czystej energii ogranicza także ryzyko regulacyjne oraz wzmacnia konkurencyjność przedsiębiorstw.

Dyskutowana w artykule problematyka, w zamiarze, ma służyć inspiracji środowisk odpowiedzialnych za planowanie i programowanie rozwoju systemów bezpieczeństwa państwa oraz środowiska społeczno-gospodarczego i naukowego do podejmowania wysiłków dotyczących poszukiwania możliwości integracji czystej energii do poprawy efektywności logistyki i budowania odporności globalnych łańcuchów dostaw.

Słowa kluczowe: czysta energia, odnawialne źródła energii, łańcuch dostaw, dekarbonizacja, zielona logistyka, odporność, transformacja energetyczna

* Instytut Energetyki Ciepłej, Politechnika Poznańska.

1. WPROWADZENIE

Wraz z implementacją strategii UE z 2019r. dotyczącej osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 r. oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 55% do 2030r., która zawierała między innymi pakiet transformacji energetyki [European Climate Pact, Europejski Zielony Ład 2019] jako kluczowe założenia i cele przyjęto promowanie odnawialnych źródeł energii, zwiększenie efektywności energetycznej i modernizację sieci.

Wraz z wdrażaniem wspomnianych uregulowań coraz częściej pojawiało się w domenie publicznej, artykułach i opracowaniach określenie – czysta energia, które to pojęcie było i jest definiowane i interpretowane na różnoraki sposób. Na potrzeby niniejszego opracowania można określić **czystą energią** jako energię pozyskiwaną ze źródeł, które podczas wytwarzania i użytkowania nie emitują gazów cieplarnianych ani zanieczyszczeń, wywierając minimalny negatywny wpływ na środowisko. Obejmuje ono głównie odnawialne źródła energii (OZE) takie jak słońce, wiatr, woda i geotermia.

Uwzględniając istotę **łańcuchów dostaw** polegającą na integracji procesu planowania, pozyskiwania, wytwarzania, dostawy i zwrotów, łączącą dostawców z klientami w połączeniu ze strategią operacyjną przepływu dóbr, pracy, kapitału i informacji [Waters 2007, Zsidisin 2009, Kasprzak 2005] można wskazać iż implementacją rozwiązań z obszaru czystej energii, w zaproponowanym jej rozumieniu, ma szeroki potencjał wpływania na poprawę odporności łańcuchów dostaw, a tym samym jest determinantem ich transformacji. Energia, szczególnie jej czysta postać, pełni zatem fundamentalną funkcję dla efektywności i odporności w łańcuchów dostaw. Dotyczy to zarówno procesów produkcyjnych, jak i magazynowania i transportu.

We wspomnianym kontekście znaczenie wykorzystania czystej energii przejawia się głównie w: redukcji emisji, stabilizacji kosztów energii w długim okresie oraz wzroście odporności operacyjnej poprzez dywersyfikację źródeł energii.

Przedstawiona w artykule problematyka z jednej strony dotyczy uwypuklenia znaczenia energii dla poprawnego funkcjonowania łańcuchów dostaw. Z drugiej strony ma ona na celu przedstawienie powiązań wpływających na skuteczność działań logistycznych w szerokim znaczeniu rozciągającym się od logistyki przedsiębiorstwa sięgając do mega procesu jakim jest logistyka obronna państwa.

Uwzględniając wspomniane i zarysowane w artykule perspektywy wykorzystania czystej energii można uznać za przedmiot dalszych rozważań, będących również inspiracją także dla szerokiego grona środowisk zajmujących się problematyką odporności łańcuchów dostaw, w tym działalności logistycznej do podejmowania szerszej dyskusji i działań poprawiających skuteczność zadań realizowanych w integrującym się coraz mocniej systemie logistycznym szeroko rozumianym jako zintegrowany łańcuch dostaw [Mecalux 2022].

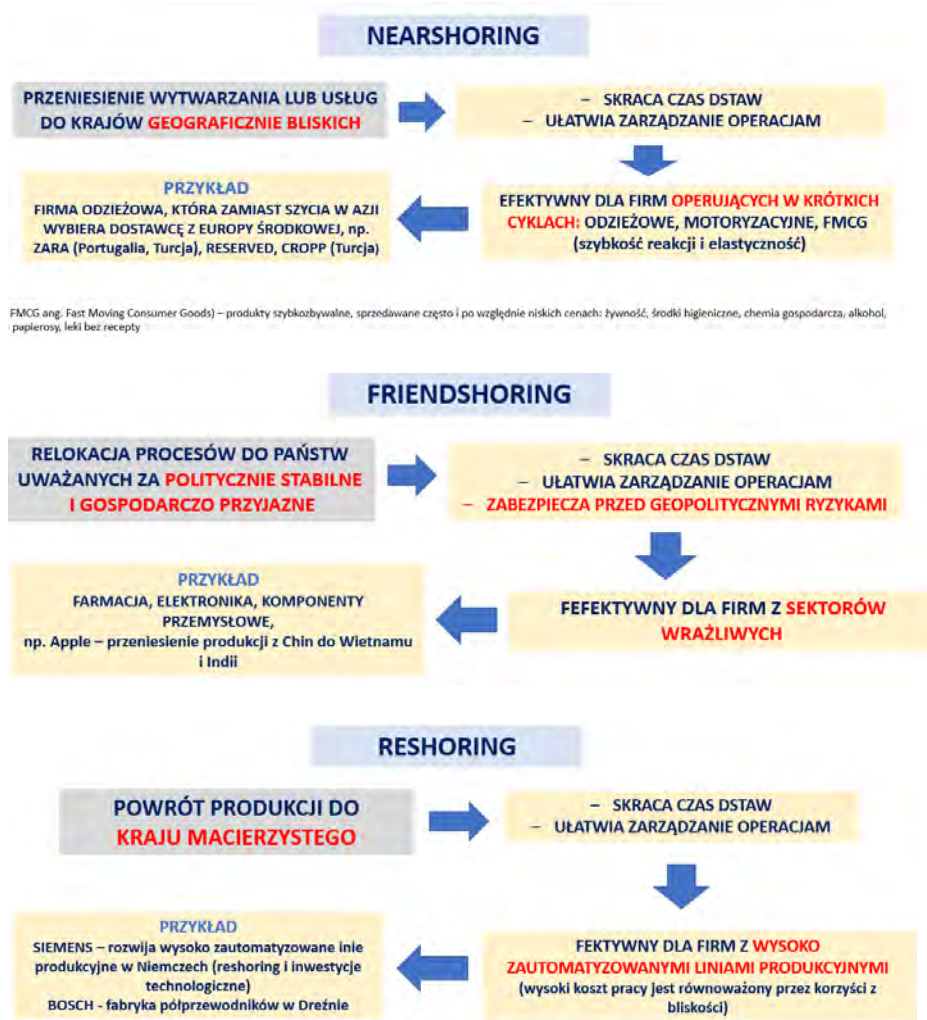
2. DOSTĘPNOŚĆ ENERGII WYZNACZNIKIEM TRANSFORMACJI I CZĘŚCIĄ DYWERSYFIKACJI ŁAŃCUCHÓW DOSTAW

Łańcuchy dostaw, szczególnie w wymiarze globalnym, były dotychczas postrzegane jako symbol efektywności, niskich kosztów i przewidywalności. Wytwarzanie a Azji, montaż w Europie, dystrybucja na cały świat to model, który działał sprawnie przez dekady [Logistyka, 2025]. Nadmierna koncentracja produkcji w odległych regionach, w sytuacji zaburzeń wywołanych pandemiemi, szczególnie pandemią COVID-19, konfliktami regionalnymi czy w rejonach, w których ulokowana jest produkcja i dystrybucja kluczowych surowców, czy to metali ziem rzadkich czy węglowodorów, a także kryzys na rynku półprzewodników czy wreszcie zaburzenia w funkcjonowaniu szlaków komunikacyjnych i portów morskich rzutują na konieczność ukierunkowania architektury łańcuchów dostaw na odporność, elastyczność i niezależność [Fałkowski, 2026].

Także tendencje wynikające z przyjmowanych przepisów i trendów środowiskowych wpływają na zmianę podejścia do kształtu, rozległości, zintegrowania czy kompleksowości łańcuchów dostaw. Przykłady tego typu wpływu można odnaleźć w regulacjach Unii Europejskiej dotyczących bezpieczeństwa dostaw półprzewodników [EU Chips Act, 2023], czy wsparcia dla lokalnych producentów półprzewodników w USA [Chips and Science Act, 2022]. Skracanie łańcuchów dostaw ukierunkowane na zmniejszenie śladu węglowego [ESG, 2024], czy automatyzacja i cyfryzacja mające na celu sprawniejsze zarządzanie bardziej rozproszonymi i elastycznymi strukturami dostaw są kolejnymi przykładami wspomnianych tendencji.

Zauważa się formułowanie strategii opartych na przeniesieniu i ulokowanie działalności bliżej rynków zbytu, do krajów politycznie stabilnych, w tym do własnego kraju. Ostatnio ta tendencja, dotychczas lansowana w odniesieniu do cywilnych łańcuchów dostaw, jest widoczna także w odniesieniu do obszaru bezpieczeństwa. Przykładem może tu być unijny program SAFE [SAFE, 2026].

Od kiedy zakłócenia łańcuchów dostaw stały się regułą, wybór odpowiedniej strategii lokalizacji dostaw urasta do rangi i decyzji strategicznej. Wzmocnienie stabilności systemu dostaw może zatem być realizowane w wyniku implementacji jednego z trzech możliwych wariantów, strategii: nearshoringu, friendshoringu czy reshoringu. Wymienione strategie to nie tylko reakcje na nagłe wydarzenia, ale świadome programy rozwoju, które kształtują długofalowe strategie firm. [Logistyka, 2025]. Istotę strategii przedstawiono na rysunku nr 1.



Rys. 1. Istota strategii: nearshoring, friendshoring, reshoring. Opracowanie własne na podstawie Mikołaj Sadocha. Nearshoring, friendshoring czy reshoring? Jaką wybrać strategię dla swojego łańcucha dostaw. Logistyka 2/2025, s. 11-13

Należy zauważyć, że zarówno czynniki zewnętrzne, jak i trendy w kształtowaniu łańcuchów dostaw muszą zmierzać w kierunku zapewnienia ich odporności, elastyczności i niezależności. Mając na uwadze wszystkie z wymienionych strategii dostosowawczych w czytelny sposób zauważyć należy czynnik ograniczający konsumpcję energii zarówno w związku z ograniczeniem kształtu, a szczególnie rozpiętości łańcuchów dostaw, w tym ich ukierunkowaniem na wykorzystanie czystej energii [Chłąd, Jankowski, 2023, Dziedzic 2022]

3. ZASTOSOWANIE CZYSTEJ ENERGII W OGNIWACH ŁAŃCUCHA DOSTAW

Istota łańcuchów dostaw (ŁD) rozumiana jako sieć producentów i usługodawców, którzy współpracują ze sobą w celu wytwarzania dóbr i świadczenia usług pożądaných przez użytkowników końcowych w ramach którego występują przepływy dóbr fizycznych, informacji i środków finansowych [Bozard, Handfield, 2021] w kontekście problematyki wykorzystania czystej energii zawiera szereg możliwych implementacji tej technologii prowadząc do zwiększenia odporności zarówno ognia jaki i całego ŁD.

Idąc za stwierdzeniem Thomasa Reida, który jako pierwszy w 1786 r. w dziele pt. „Essays on the Intellectual Powers of Man” użył określenia, które następnie stało się idiomem i określało iż „łańcuch nie jest mocniejszy niż jego najsłabsze ogniwo” warto spojrzeć na klika z ogniw ŁD, które z jednej strony pełnią w nim krytyczną rolę, a z drugiej posiadają potencjał do wykorzystania w nich czystej energii. Należą do nich obszary: produkcji, przechowywania i spedycji oraz transport.

W odniesieniu do pierwszego z nich – **produkcji zasilanej energią odnawialną** - można wskazać na rosnącą tendencję wykorzystania energii pochodzącej z instalacji fotowoltaicznych i farm wiatrowych (OZE). W 2025 roku dostępność energii pochodzącej z tych źródeł w Polsce przekroczyła 50% mocy zainstalowanej i 30% wyprodukowanej [MŚiK, 2026] Produkcja zasilana czystą energią pozwala na: obniżenie intensywności emisji produktowej, zwiększenia atrakcyjności oferty dla partnerów wymagających stosowania standardów środowiskowych (ESG¹) oraz redukcję ryzyka związanego z systemami opłat za emisję. Wdrażanie odnawialnych źródeł energii sprzyja także lokalizacji produkcji bliżej rynków zbytu (nearshoring), jeśli region oferuje dostęp do stabilnych i tanich OZE.

Drugi z istotnych obszarów ŁD – **magazynowanie i spedycja** (zielone centra logistyczne) to obszar, w którym zastosowanie czystej energii ogranicza koszty operacyjne i poprawia wskaźniki środowiskowe przedsiębiorstwa. Nowoczesne magazyny wykorzystują: instalacje fotowoltaiczne na dachach i parkingach, magazyny

¹ ESG (Environmental, Social, and Governance) to zestaw standardów środowiskowych, społecznych i ładu korporacyjnego, używanych do oceny wpływu firmy na otoczenie i ryzyka biznesowego. Obejmuje ochronę środowiska (emisje, zasoby), odpowiedzialność społeczną (pracownicy, społeczność) oraz ład korporacyjny (etyka, transparentność). ESG jest kluczowe dla zrównoważonego rozwoju i raportowania niefinansowego. DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2022/2464 z dnia 14 grudnia 2022 r. w sprawie zmiany rozporządzenia (UE) nr 537/2014, dyrektywy 2004/109/WE, dyrektywy 2006/43/WE oraz dyrektywy 2013/34/UE w odniesieniu do sprawozdawczości przedsiębiorstw w zakresie zrównoważonego rozwoju

energii, pompy ciepła, energooszczędne systemy oświetlenia, urządzenia magazynowe i pojazdy (V2G²) czy inteligentne systemy zarządzania energią. Wykorzystują także infrastrukturę o wysokim wskaźniku efektywności energetycznej.

Kolejny z obszarów kluczowych w ŁD, w którym potencjał wykorzystania czystej energii jest duży **to transport**. Z jednej strony transport jest najbardziej emisyjnym ogniwem ŁD, ale z drugiej jest on obszarem najintensywniej wdrażanych rozwiązań dekarbonizujących jego działanie. Dekarbonizacja transportu zmierza do zmniejszenia, a docelowo całkowitego wyeliminowania emisji dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych związanych z działalnością transportową. Operatorzy logistyczni inwestują we: flotę pojazdów elektrycznych, paliwa alternatywne (biopaliwa, metanol, wodór) czy rozwój transportu intermodalnego. Działania te mają na celu między innymi: zwiększenie efektywności energetycznej pojazdów i infrastruktury transportowej, przejście na niskoemisyjne lub zeroemisyjne źródła energii, optymalizację systemów transportowych i logistycznych oraz promowanie zrównoważonych form transportu. Zauważyć należy również, iż wskazany trend i podejmowane działania napotykają również na trudności wpływając na dynamikę transformacji. Należy do nich oprócz kosztów pojazdów elektrycznych także dostępność infrastruktury do ich ładowania. W tym drugim przypadku także fragmentacja rynku ładowania pojazdów elektrycznych – tzw. elektryczne karty paliwowe [Logistyka, 2025 r.]

Wpływ czystej energii na zasadnicze ogniwa łańcucha dostaw przedstawiono na rysunku nr 2.

WPYW CZYSTEJ ENERGII NA ZASADNICZE OGNIWA ŁAŃCUCHA DOSTAW				
OGNIWO ŁAŃCUCHA	ZASTOSOWANIE CZYSTEJ ENERGII	EFEKT EKONOMICZNY	EFEKT ŚRODOWISKOWY	EFEKT STRATEGICZNY
PRODUKCJA	OZE (PV, PPA), elektryfikacja procesów	Stabilizacja kosztów energii	Redukcja emisji bezpośredniej i pośredniej Scope 1-2	Zmniejszenie ryzyka regulacyjnego
MAGAZYNOWANIE	Instalacje dachowe PV, pompy ciepła	Spadek kosztów operacyjnych	Niższy ślad węglowy	Autonomia energetyczna
TRANSPORT	EV, biopaliwa, wodór	Niższe koszty paliw w długim okresie	Redukcja emisji bezpośredniej i pośredniej Scope 1-3	Zwiększona odporność na wahania cen ropy

Rys. 2. Wpływ czystej energii na zasadnicze ogniwa łańcucha dostaw. Opracowanie własne na podstawie analizy dostępnej literatury

² V2G ang. vehicle-to-grid. Technologia vehicle-to-grid umożliwia dostarczanie pojazdom elektrycznym energii z powrotem do sieci.

4. WYZWANIA ENERGETYCZNE W ŁAŃCUCHACH DOSTAW

Paleta zagrożeń dla funkcjonowania łańcuchów dostaw ma charakter dynamiczny, a konieczność adaptacji do zmieniających się realiów na znaczenie fundamentalne. Do niedawna, globalne łańcuchy dostaw, jak wspomniano wcześniej były symbolem efektywności, niskich kosztów i przewidywalności. Wspomniane wcześniej zdarzenia destabilizujące ŁD, a także ostatnie wydarzenia na Bliskim Wschodzie, czy napięcia pomiędzy USA i Chinami spowodowały poważne konsekwencje w funkcjonowaniu ŁD i konieczność zmiany podejścia z optymalizacji procesów pod względem kosztów na odporność, niezależność i stabilność prowadzące do wzmocnienia stateczności systemu dostaw [Logistyka, 2025r.]. W tym kontekście ciągle aktualne są także zagrożenia dotyczące zagrożeń: cybernetycznych, zagrożeń środowiskowych czy problemów wynikających z kryzysów finansowych [Szymonik 2016r.]. Warto również wspomnieć o zagrożeniach związanych z destabilizacją sygnału GPS [GISPLAY.PL, 2025r.], implementacją rozwiązań AI, czy zagrożeń związanych z użyciem technologii dronowej. W tym krajobrazie zagrożeń, ze względu na istotny wpływ na funkcjonowanie łańcuchów dostaw, ma nieprzerwany dostęp i ciągłość świadczenia usług zasilania ogniw i całego łańcucha dostaw w energię ma zasadnicze znaczenie.

Analogicznie do każdego z łańcuchów dostaw dóbr i usług, także łańcuch dostaw energii, będący jego ogniwem, procesem wspierającym podlega tym samym zjawiskom i wyzwaniom [Dziedzic, 2023]. Energia, stanowiąc fundament ich funkcjonowania, jest wrażliwym miejscem, celem i obiektem, którego destabilizacja wpływa na funkcjonowanie ŁD. Z tego powodu wykorzystanie energii powinno być chronione zarówno w domenie fizycznej, rozwiązań technicznych jak również organizacyjnych, w tym polityki kadrowej, teleinformatycznej czy prawnej. Z perspektywy rozwiązań prawnych dotyczących ochrony infrastruktury krytycznej, mając na uwadze znaczenie energii dla funkcjonowania ŁD należy uznać ten zasób jako zasób krytyczny podlegający ochronie zarówno ze względu na sprawność procesów gospodarczych, jak również na jakość świadczonych usług dla odbiorców instytucjonalnych i indywidualnych. Można zatem uznać, iż dostarczane energii, a co za tym idzie funkcjonowanie ŁD w systemach kluczowych: finansowym, ochrony zdrowia, transporcie czy łączności i alarmowania wypełnia swoim znaczeniem pojęcie infrastruktury krytycznej [Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej, 2023r., Ustawa o zarządzaniu kryzysowym 22027 r.

Budowanie odporności energetycznej powinno uwzględniać cechy i ryzyka zarówno tradycyjnego jak i niskoemisyjnego modelu funkcjonowania ŁD. Zauważalne są zalety i wady obu z tych systemów, które przedstawiono w zestawieniu na rysunku nr 3.

PORÓWNANIE TRADYCYJNEGO I NISKOEMISYJNEGO MODELU ENERGETYCZNEGO		
KRYTERIUM	MODEL TRADYCYJNY	MODEL OPARTY NA CZYSTEJ ENERGII
ŹRÓDŁO ENERGII	PALIWA KOPALNE	OZE + ELEKTRYFIKACJA
ZMIENNOŚĆ KOSZTÓW	WYSOKA	UMIARKOWANA / NISKA
EMISJE CO ₂	WYSOKA	NISKIE
RYZYKO REGULACYJNE	NISKA	WYŻSZA

Rys. 3. Porównanie tradycyjnego i niskoemisyjnego modelu energetycznego ŁD.
Opracowanie własne na podstawie analizy dostępnej literatury

Mogące pojawić się dylematy dotyczące decyzji związanych z wyborem jednego z analizowanych dwóch modeli energetycznych w aktualnych uwarunkowaniach powinny kierować aktywność osób i środowisk odpowiedzialnych za ich funkcjonowanie na uzyskanie maksymalnej odporności, a co za tym idzie zapewnienie bezpieczeństwa ich funkcjonowania. Działania w tym obszarze wymagają myślenia całościowego, odejścia od oczekiwań działania tylko pojedynczych firm i instytucji i koncentracji aktywności powiązanej z systemami państwa, technologiami cyfrowymi i globalnymi przepływami towarów [Fałkowski, 2026]. W tym zakresie należy zauważyć możliwości tworzone przez regulacje międzynarodowe w zakresie odporności energetycznej [ISO 22366:2026] [CER, 2022] [NIS-2,2022 impl. 2026]. Na szczególne zainteresowanie zasługują zagadnienia związane z badaniami nad poprawą odporności, edukacją personelu oraz możliwościami finansowania zadań związanych z budowaniem odporności z połączonych budżetów firm i instytucji oraz państwa. W tym kontekście warto zauważyć szereg rozwiązań opracowywanych i wdrażanych w tym zakresie, np. dotyczących magazynowania energii [Griffin, 2026] czy ochrony kluczowych obiektów energetycznych przed zagrożeniami rakietowymi czy dronowymi [IMPAKT MODULAR X, 2026].

Warto zauważyć, podnosząc znaczenie działań wspólnych zarówno pomiędzy ogniwami ŁD, jak również pomiędzy podmiotami państwowymi regionalnymi i globalnymi, istotą jest wspólne inwestowanie w zasoby krytyczne. Stanowi to także wyzwanie dla wykorzystywania energii w ŁD. Należy mieć na uwadze, że odporność nie jest produktem jednej firmy czy instytucji. Odporność jest dobrem wspólnym, które wymaga współdzielenia zasobów, wiedzy i odpowiedzialności. W takim modelu dopiero cały system, a nie tylko jego fragmenty może wytrzymać presję wywieraną na ŁD. A presja we współczesnych warunkach, we współczesnym świecie będzie tylko rosła [Fałkowski, 2026].

5. ODPORNOŚĆ ENERGETYCZNA ŁAŃCUCHÓW DOSTAW JAKO PRZEWAGA KONKURENCYJNA

W wielu opiniach panuje przekonanie, że odporność wiąże się z koniecznością angażowania znacznych środków, mogąc wpłynąć na konkurencyjność realizowanych przedsięwzięć biznesowych. Tym czasem, inwestowanie w tym obszarze jest wymogiem uzyskiwania konkurencyjności. Działania wewnątrz ogniw ŁD zmierzających do pozyskiwania i magazynowania energii z własnych zasobów prowadzą do większej jego odporności. Także działania całościowe energetycznych podmiotów państwowych i prywatnych modyfikując tzw. mix energetyczny tworzą warunki do coraz szerszego wykorzystania czystej energii co w skutkach wzmacnia odporność ŁD i buduje przewagę konkurencyjną [Globenergia, 2026, Wysokie Napięcie, 2026].

Wspomniane efekty można ilustrować i analizować wykorzystując kilka z możliwych modeli analitycznych integracji czystej energii w ŁD.

1. Model koncepcyjny zależności pomiędzy integracją czystej energii (CE-Clean Energy) w wynikami łańcucha dostaw (SCP – Supply Chain Performance). Wskazuje on na fakt braku bezpośredniego wpływu czystej energii wyłącznie na koszty. Oddziałuje on natomiast systemowo na ograniczenie kosztów poprzez poprawę efektywności i redukcję ryzyka. Struktura modelu przedstawiająca zależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi, pośredniczącymi i zależnymi przedstawiałaby się następująco:

$$CEI \rightarrow (EFE, CAR, ERS) \rightarrow (SCP, SCR, ESGP)$$

gdzie:

zmienną niezależną jest CEI (Clean Energy Integration Index) – wskaźnik czystej energii, mierzony jako: udział OZE w całkowitym zużyciu energii (%), stopień elektryfikacji transportu (% floty niskoemisyjnej) oraz poziom autonomii energetycznej (udział energii własnej);

zmiennie pośredniczące to: EFE – efektywność energetyczna, CAR – redukcja emisji CO₂, ERS – stabilność kosztów energii.

zmiennie zależne to: SCP efektywność łańcucha dostaw. SCR – odporność łańcuchów dostaw, ESGP – wyniki w obszarze ESG (czynnik oceny zrównoważonego rozwoju)

2. Model ekonomiczny stabilizacji kosztów energii umożliwia przedstawienie zmienności kosztów energii. Analiza zaproponowanego modelu może prowadzić do wniosku, iż wraz ze wzrostem udziału stabilnych źródeł OZE (EC_s) wrażliwość na wahania ceny paliw kopalnych (P_f) maleje, a co za tym idzie wrażliwość na zmienność kosztów energii maleje. Model ten charakteryzuje następująca zależność:

$$\sigma_E = f(P_f, P_e, D, EC_s)$$

gdzie:

σ_E - zmienność kosztów energii;

P_f - cena paliw kopalnych;

P_e - cena energii elektrycznej z sieci;

D – zapotrzebowanie energetyczne;

EC_s – udział stabilnych źródeł OZE (np. długoterminowe kontrakty na dostawę czyste energii z OZE ze stałą ceną – PPA)

3. Model odporności energetycznej (Energy Resilience Ratio – ERR), który może obrazować wrażliwość ŁD na szoki energetyczne. Zaproponowany model wskazuje na zależność polegającą na tym, że im wyższy ERR, tym większa odporność ŁD na szoki energetyczne. Model ten może być charakteryzowany następującą zależnością:

$$ERR = \frac{E_{local} + E_{renew}}{E_{total}}$$

gdzie:

E_{local} – energia produkowana lokalnie;

E_{renew} – energia z OZE;

E_{total} – całkowite zużycie energii.

Każdy z zaproponowanych modeli analitycznych wskazuje na zależność dotyczącą odporności ŁD ze względu na dostęp, koszty wykorzystania, w tym posiadanych zdolności do produkcji i magazynowania energii wykorzystywanej w ogniwach ŁD. Warto również zwrócić uwagę na czynniki zawarte w pierwszym z proponowanych modeli jakie dotyczą efektywności energetycznej zarówno procesów, jak i urządzeń oraz infrastruktury, które oprócz dywersyfikacji własnych zdolności wpływają również na poprawę odporności energetycznej ŁD.

Zaproponowane modele analityczne mogą posłużyć do oceny każdego z ŁD w zakresie oceny jego odporności na zasilanie w energię oraz wskazywać na czynniki, których zmiana może powodować poprawę bezpieczeństwa.

6. PODSUMOWANIE

Energia stanowi strategiczny zasób w zarządzaniu łańcuchem dostaw. Jej znaczenie wykracza poza wymiar kosztowy i obejmuje aspekty środowiskowe, regulacyjne oraz ryzyka operacyjne. Transformacja energetyczna, obejmująca zwiększenie efektywności, rozwój OZE oraz dekarbonizację transportu, staje się kluczowym elementem budowania konkurencyjności i odporności przedsiębiorstw. W kluczowych

dziedzinach gospodarki wspomniane działania mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo i zapewnienie ciągłości świadczenia usług dla społeczeństwa. Ma to znaczenie szczególnie w warunkach związanych z niestabilnością, zakłóceniami porządku, kryzysami finansowymi czy incydentami w cyberprzestrzeni, zakłóceniami sygnału GPS oraz kryzysami militarnymi.

Z tej perspektywy da się zauważyć także trend dotyczący dalszej integracji zarządzania energią z cyfrowymi systemami planowania oraz wzrostu znaczenia lokalnych, niskoemisyjnych źródeł energii - energetyki rozproszonej w strukturze łańcuchów dostaw.

Przedstawiona w artykule problematyka, obserwacje i rekomendacje dotyczące wykorzystania czystej energii jako czynnika determinującego budowanie bardziej odpornych łańcuchów dostaw jest wynikiem krytycznego przeglądu literatury, obserwacji i doświadczeń własnych autora. Jest jednocześnie nakierowana na wskazanie konieczności podjęcia działań w zakresie implementacji rozwiązań organizacyjnych, technicznych, teleinformatycznych, ochrony fizycznej i tworzenia warunków prawnych i finansowych w celu poprawy skuteczności realizacji zadań w ŁD w zmiennym środowisku bezpieczeństwa.

Omówione w artykule: dostępność, wykorzystanie, wyzwania dotyczące zastosowania czystej energii w ŁD oraz wyzwania, czy zaproponowane modele oceny ich odporności pozwalają na sformułowanie kilku wniosków posiadających ogólny charakter:

1. Łańcuch dostaw dóbr i usług może sprawnie realizować przypisane mu zadania, szczególnie w odniesieniu do kluczowych obszarów, jeśli posiada zasilanie w odporną na zakłócanie własną lub/i zewnętrzną energię, która stanowi kluczowy zasób i może być ogniwiem, którego ochrona nie jest alternatywą, lecz koniecznością decydującą o odporności całego ŁD.
2. Działania w zakresie zapewnienia odporności dostaw energii wykorzystywanej w ŁD powinno być działaniem wszystkich podejmujących działania w tym obszarze: przedstawicieli biznesu, pracowników firm, polityków tworząc zarówno warunki prawne, finansowe, jak i organizacyjne do kształtowania rozproszonego zdedyfikowanego systemu zasilania w energię opierając się na miksie uwzględniającym rosnącą rolę wytwarzania czystej energii z OZE i poszerzania dostępności w wyniku jej magazynowania.
3. Równoległe z rozwijaniem zdolności wytwarzania, przesyłu, magazynowania i udostępniania czystej energii użytkownikom przemysłowym i indywidualnym konieczne jest zdynamizowanie działań w kierunku poprawy efektywności energetycznej obiektów infrastruktury czy systemów technicznych wykorzystywanych w ŁD.
4. Tworzenie warunków prawnych, oprócz oczekiwanej implementacji do porządku prawnego w Polsce unijnej dyrektywy CER z 2022 r. powinno wiązać się także z wykorzystaniem i wdrożeniem rozwiązań stosowanych w państwach dotkniętych konfliktem zbrojnym (np. Ukraina) dotyczących nowelizacji właściwych przepisów dot. warunków technicznych obiektów infrastrukturalnych.

Wspomniana nowelizacja powinna dotyczyć zarówno nowobudowanych i modernizowanych obiektów energetycznych w zakresie ograniczenia fizycznego dostępu, ich ochrony przed uderzeniem czy wybuchem ładunków w pobliżu oraz tworzenia zapasów urządzeń, których prawdopodobieństwo uszkodzenia mogłoby prowadzić do istotnych zaburzeń w ŁD.

5. Powszechna edukacja zarówno ukierunkowana na personel operatorów infrastruktury energetycznej, uczestników ŁD oraz społeczeństwa powinna zawierać podstawowe informacje dotyczące standardów bezpieczeństwa, jak również sposobów poprawy odporności ogniów ŁD czy użytkowników – klientów w obszarach kluczowych dla ich funkcjonowania.

Zaprezentowane w artykule zagadnienia dotyczące wykorzystania czystej energii w łańcuchach dostaw w kierunku budowania ich większej odporności mogą stanowić obszar zainteresowania środowisk kreujących strategię rozwojowe, środowisk gospodarczych i akademickich. Przedstawiona problematyka może stanowić także impuls do doskonalenia odporności w kluczowych dla funkcjonowania państwa obszarach. Jak wspomniano w artykule odporność ŁD nie jest przywilejem, lecz warunkiem ich efektywności i konkurencyjności z jednej strony, z drugiej zaś jest warunkiem ciągłości świadczenia kluczowych usług. Niezbędne jest zatem zmiana postrzegania odporności energetycznej ŁD dotychczas rozpatrywanej jako koszt na strategię, która wymaga konsekwentnego inwestowania zasobów w odporność społeczeństwa i państwa jako całości.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Ficoń K. Trzy logistyki. Wojskowa, kryzysowa, rynkowa. Wydawnictwo Belstudio, Warszawa 2015 r.
2. Konecka S., Kulińska E, Dendera-Gruszka M., *Zarządzanie ryzykiem łańcuchów dostaw*”, wyd. Difin, 2019r.
3. D. Waters. „*Supply chain risk. Management, Vulnerability and resilience in Logistics*”, Kogan Page Ltd. 2007r.
4. G. A. Zsidisin, B. Ritchie „*Supply chain risk. A handbook of assessment, management, and performance*”, Springer Science+Business Media, LLC 2009.
5. T. Kasprzyk „*Modele referencyjne w zarządzaniu procesami biznesu*”, wyd. Difin, Warszawa 2005 r.
6. Cacil C. Bozard, Robert B. Handfield „*Wprowadzenie do zarządzania operacjami i łańcuchem dostaw*”. Wydanie V, Helion S.A. Gliwice, 2021 r.

Artykuły w czasopismach

1. Europejski zielony ład. Aspirowanie do miana pierwszego kontynentu neutralnego dla klimatu. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pl
2. European Climate Pact https://climate-pact.europa.eu/about/about-pact_en (dostęp 3.03.2026r.)
3. Mecalux „Jak działa zintegrowany łańcuch dostaw” 2022 <https://www.mecalux.pl/blog/zintegrowany-lancuch-dostaw> (28.02.2026 r.)
4. Mikołaj Sadocha. Nearshoring, friendshoring czy reshoring? Jaką wybrać strategię dla swojego łańcucha dostaw. *Logistyka* 2/20225r. s. 11-15, <https://www.logistyka.net.pl/czasopismo/item/96340-czasopismo-logistyka-nr-2-2025-maj> (25.02.2026 r.)
5. Andrzej Fałkowski, „Jak budować odporne łańcuchy dostaw w erze wysokiego ryzyka” <https://defence24.pl/polityka-obronna/jak-budowac-odporne-lancuchy-dostaw-w-erze-wysokiego-ryzyka> (27.01.2026r.)
6. Monika Chłąd, Politechnika Częstochowska ANALIZA ZUŻYCIA ENERGII W TRANSPORCIE W ASPEKTCIE ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU https://sbc.org.pl/Content/363032/PDF/ch%C5%82%C4%85d_monika.pdf (10.03.2026.)
7. Przemysław Jankowski Zielona energia w magazynach to kierunek przyszłości, *Logistyka*, 2023 <https://www.logistyka.net.pl/aktualnosci/komentarz-tygodnia/item/94333-zielona-energia-w-magazynach-to-kierunek-przyszlosci> (10.03.2026 r.)
8. Jan Dziędzic, Trendy, szanse, ograniczenia i wyzwania w rozwoju logistyki wojskowej i cywilnej z perspektywy możliwości wykorzystania dostępnych zasobów energii. „Perspektywy logistyki wojskowej i cywilnej w kontekście zapewnienia odporności energetycznej siłom zbrojnym” Wyd. Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Warszawa 2024 r.
9. Jan Dziędzic, Logistyczne aspekty zapewnienia odporności infrastruktury energetycznej bronionej przez siły powietrzne. „Siły powietrzne w obronie energetycznej infrastruktury krytycznej” Wyd. Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Warszawa 2023 r.
10. Łańcuch dostaw — definicja, rodzaje oraz metody zarządzania SCM. <https://omida.pl/blog/lancuch-dostaw-czym-jest/> (dostęp 21.11.2023 r.)
11. Myszak J.M., Sowa M. Zarządzanie ryzykiem w łańcuchu dostaw. Wyd. PTiL 4/2016 (dostęp 10.02.2024 r.).
12. Polska osiąga 50% mocy z OZE - historyczny przełom! <https://www.gov.pl/web/klimat/polska-osiaga-50-mocy-z-oze--historyczny-przelom> (20.03.2026 r.).
13. Elektryfikacja transportu zakładnikiem infrastruktury <https://logistyka.net.pl/elektryfikacja-transportu-zakladnikiem-infrastruktury/> (21.03.2026 r.).
14. Innowacyjne rozwiązania ochronne dla infrastruktury krytycznej IMPACT MODULAR X , www.ipsx.pl (24.03.2026 r.)
15. Miks energetyczny Polski w 2025 roku. 50% mocy zainstalowanej to OZE! <https://globenergia.pl/miks-energetyczny-polski-w-2025-roku-50-mocy-zainstalowanej-to-oze/> (24.03.2026 r.) In
16. Miks energetyczny Polski <https://wysokienapiecie.pl/tag/miks-energetyczny-polski/> (24.03.2026 r.)

17. SAFE (ang. Security Action for Europe) to epokowe wydarzenie dla bezpieczeństwa Polski i Europy. <https://www.gov.pl/web/premier/safe-to-epokowe-wydarzenie-dla-bezpieczenstwa-polski-i-europy> (10.03.2026 r.)
18. Zaprezentowano koncepcję Polskiej Tarczy PNT, która ma chronić przed zakłóceniami sygnałów GPS/GNSS <https://gisplay.pl/nawigacja-satelitarna/11970-zaprezentowano-koncepcje-polskiej-tarczy-pnt-ktora-ma-chronic-przed-zakloceniami-sygnaLOW-gps-gnss.html> (25.03.2026r.)

Normy

1. Dariusz Rycek, ISO 22366:2026 – Ramy i zasady dotyczące odporności energetycznej <https://coe.biz.pl/iso-22366-odpornosc-energetyczna/> (19.03.2026r.)
2. O/PAS 28000:2005 Wymagania dla systemu zarządzania bezpieczeństwem łańcucha dostaw

Ustawy, rozporządzenia, dyrektywy, deklaracje

1. EU Chip Act, 2023r. <https://www.european-chips-act.com/> (10.03.2026r.)
2. Chips and Science Act. 2022r. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/4346> (10.03.2026r.)
3. Rezolucja przyjęta przez Zgromadzenie Ogólne w dniu 25 września 2015 r. https://www.unic.un.org.pl/files/164/Agenda%202030_pl_2016_ostateczna.pdf (10.03.2026 r.)
4. Narodowy Program ochrony Infrastruktury krytycznej 2023, <https://www.gov.pl/web/rcb/narodowy-program-ochrony-infrastruktury-krytycznej> (18.03.2026 r.)
5. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym Dz.U. 2007 nr 89 poz. 590 <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20070890590> (18.03.2026 r.)
6. Dyrektywa parlamentu europejskiego i rady (UE) 2022/2555z dnia 14 grudnia 2022 r. w sprawie środków na rzecz wysokiego wspólnego poziomu cyberbezpieczeństwa na terytorium Unii, zmieniająca rozporządzenie (UE) nr 910/2014 i dyrektywę (UE) 2018/1972 oraz uchylająca dyrektywę (UE) 2016/1148 (dyrektywa NIS 2) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:32022L2555> (18.03.2026 r.)
7. Ustawa z dnia 23 stycznia 2026 r. o zmianie ustawy o krajowym systemie cyberbezpieczeństwa oraz niektórych innych ustaw Dz.U. 2026 poz. 252
8. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2022/2557 z dnia 14 grudnia 2022 r. w sprawie odporności podmiotów krytycznych i uchylająca dyrektywę Rady 2008/114/WE <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX:32022L2557> (18.03.2026 r.).
9. Ustawa z dnia 11 marca 2022 r. o obronie Ojczyzny (Dz.U.2022 poz.655).
10. SAFE (Security Action for Europe), 2026r. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-defence-industry/safe-security-action-europe_en (10.03.2026r.)

CLEAN ENERGY AS A DETERMINANT OF SUPPLY CHAINS TRANSFORMATION, EFFICIENCY, AND RESISTANCE

Abstract

Energy transformation is one of the key megatrends shaping modern supply chains. Growing regulatory pressure, stakeholder expectations, and the need to reduce greenhouse gas emissions are making clean energy a strategic resource for businesses. This article analyzes the role of renewable and low-emission energy sources in the decarbonization of supply chains and assesses their impact on cost efficiency and operational resilience. The study utilizes a literature review and a review of practices implemented in the logistics and industrial sectors. The results of the analysis indicate that integrating clean energy into logistics processes impacts supply chains in three dimensions: economically, by increasing cost stability; environmentally, by reducing emissions; and strategically, by increasing resilience to energy shocks. The use of clean energy also reduces regulatory risk and strengthens the competitiveness of enterprises.

The issues discussed in this article are intended to inspire those responsible for planning and programming the development of state security systems, and the socio-economic and scientific communities to undertake efforts to explore opportunities for integrating clean energy into improving logistics efficiency and building the resilience of global supply chains.

Keywords: clean energy, renewable energy, supply chain, decarbonization, green logistics, resilience, energy transition.

Jacek ELIASZ*

Agnieszka KALBARCZYK-JEDYNAK**

Mariusz SOWIŃSKI***

Krzysztof OŁDAKOWSKI***

INTERAKTYWNY MAGAZYN ENERGII - ZAŁOŻENIA KONCEPCYJNE

Celem artykułu jest przedstawienie koncepcji interaktywnego magazynu energii przeznaczonego do zasilania infrastruktury krytycznej oraz określenie jego podstawowych założeń strukturalnych i funkcjonalnych. W artykule zaprezentowano możliwość uzupełnienia istniejącej wielkopowierzchniowej sieci elektroenergetycznej lokalnym zasilaniem promieniotwórczym opartym na interaktywnych magazynach energii. Rozwiązanie to umożliwia pokrycie zapotrzebowania wysokoprądowego elementów i obiektów infrastruktury krytycznej oraz zwiększenie ich autonomii energetycznej.

Słowa kluczowe: interaktywny magazyn energii, infrastruktura krytyczna, odporność energetyczna

1. WPROWADZENIE

Bezpieczeństwo energetyczne infrastruktury krytycznej stanowi warunek funkcjonowania państwa oraz jego zdolności obronnych i administracyjnych. Ciągłość dostaw energii jest kluczowa dla ochrony życia i zdrowia, a także dla działania transportu, systemów wodociągowych oraz łączności ratunkowej. Sieci elektroenergetyczne są narażone na ekstremalne zjawiska pogodowe, przeciążenia, awarie kaskadowe, sabotaż i cyberataki. Brak energii prowadzi do paraliżu systemów i utraty kontroli operacyjnej. Dlatego obiekty krytyczne powinny mieć możliwość pracy wyspowej lub być

* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

** Politechnika Morska w Szczecinie.

*** ZEG Sp. z o.o.

wspierane lokalnym zasilaniem, z zachowaniem zdolności do samodzielnego bilansowania mocy oraz stabilizacji napięcia i częstotliwości.

Implikuje to konieczność wykorzystania aktywnych, sterowalnych magazynów energii zamiast wyłącznie agregatów prądowórczych, które cechują się opóźnieniem przełączenia, ograniczoną autonomią i zależnością od paliwa [Chowdhury et al., 2023]. Interaktywne magazyny energii stabilizują parametry sieci, buforują zakłócenia i ograniczają ryzyko awarii kaskadowych, które mogą prowadzić do wtórnych zagrożeń systemowych. W efekcie stanowią one jedno z kluczowych narzędzi zwiększających odporność infrastruktury krytycznej.

Celem odporności energetycznej jest zdolność systemu do przygotowania się na zakłócenia, ich absorpcji, odtworzenia sprawności oraz adaptacji do zmiennych warunków. Interaktywne magazyny energii integrują rozproszone źródła energii, wykorzystując ich komplementarne właściwości. Jednocześnie zróżnicowane charakterystyki pracy tych źródeł mogą prowadzić do niespójności w profilach mocy, co stanowi wyzwanie dla bezpieczeństwa systemu. Kluczowe pozostaje więc zapewnienie synergii źródeł, zdolności do samobilansowania oraz opracowanie niezawodnych strategii działania takich systemów. Infrastruktura krytyczna obejmuje systemy i obiekty niezbędne dla bezpieczeństwa państwa oraz obywateli, w tym energetykę, transport, łączność czy systemy ratownicze [Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym, 2007]. Jej znaczenie wynika z kluczowej roli w utrzymaniu stabilności państwa — zakłócenie jednego elementu może prowadzić do poważnych konsekwencji społecznych i gospodarczych.

Szczególną rolę odgrywa system elektroenergetyczny, od którego zależą inne sektory. Przerwy w dostawach energii mogą wywoływać awarie kaskadowe, wynikające z powiązań między infrastrukturą energetyczną a systemami informacyjnymi i telekomunikacyjnymi [Laprie et al., 2007]. Dlatego istotne jest nie tylko zapewnienie ciągłości dostaw, ale także zdolności do utrzymania funkcji w warunkach zakłóceń.

Współczesne podejście opiera się na koncepcji odporności, rozumianej jako zdolność do przygotowania się na zakłócenia, ich absorpcji, odbudowy oraz adaptacji [Chivunga et al., 2023], [Lin i Wu, 2024]. Obejmuje ona aspekty techniczne, cybernetyczne i organizacyjne. Rozwój rozproszonych źródeł energii, magazynów energii i mikrosieci umożliwi zwiększenie tej odporności poprzez lokalne, autonomiczne systemy zasilania ograniczające skutki awarii.

2. OGRANICZENIA TRADYCYJNYCH SYSTEMÓW ZASILANIA REZERWOWEGO

Ciągłość dostaw energii w infrastrukturze krytycznej opiera się na systemach rezerwowych, takich jak agregaty prądowórcze i UPS, jednak rosnące zagrożenia (ekstremalne zjawiska pogodowe, cyberataki, awarie kaskadowe) ujawniają ich ograniczenia [Rouholamini et al., 2025].

Systemy UPS zapewniają natychmiastowe podtrzymanie zasilania i chronią wrażliwe urządzenia, lecz ich podstawową wadą jest ograniczona pojemność – zwykle wystarczająca jedynie na kilka–kilkadziesiąt minut. W praktyce pełnią więc funkcję mostową do czasu uruchomienia agregatów, nie zapewniając długotrwałej autonomii.

Agregaty prądowocze oferują większą moc i dłuższy czas pracy, ale są zależne od dostaw paliwa, które w sytuacjach kryzysowych mogą zostać zakłócone. Ograniczenia te zwiększają znaczenie zintegrowanych systemów energetycznych, łączących różne nośniki energii i technologie. Takie podejście poprawia elastyczność, bilansowanie mocy i odporność systemu, a jego rozwinięciem są interaktywne magazyny energii umożliwiające aktywne zarządzanie energią w czasie rzeczywistym.

3. KONCEPCJA INTERAKTYWNEGO MAGAZYNU ENERGII

Pod pojęciem interaktywnego magazynu energii należy rozumieć hybrydowy magazyn energii uwzględniający dodatkowe funkcje zarządzania przepływem energii oraz integracji różnych nośników energetycznych. Interaktywny magazyn energii stanowi koncepcję zintegrowanego układu energetycznego umożliwiającego magazynowanie, konwersję oraz dystrybucję energii w wielu postaciach przy jednoczesnym aktywnym zarządzaniu przepływami energetycznymi. W przeciwieństwie do tradycyjnych magazynów energii, których funkcja ogranicza się głównie do przechowywania energii elektrycznej, rozwiązania interaktywne integrują różne technologie magazynowania oraz różne nośniki energii w ramach jednego układu funkcjonalnego. Oznacza to możliwość przekształcania energii elektrycznej w inne formy energii, w zależności od aktualnych potrzeb energetycznych obiektu. W praktyce oznacza to wykorzystanie takich technologii jak:

- baterie elektrochemiczne (np. litowo-jonowe lub kwasowo-ołowiowe),
- ogniwa paliwowe,
- elektrolizery wytwarzające wodór,
- zbiorniki magazynujące wodór lub inne gazy energetyczne,
- układy kogeneracyjne wytwarzające jednocześnie energię elektryczną i ciepło w tym OZE.

Interaktywny magazyn energii ma za zadanie integrowanie rozproszonych źródeł energii, magazynów energii oraz odbiorników energii w jeden lokalny układ elektroenergetyczny zdolny do pracy zarówno w trybie współpracy z siecią elektroenergetyczną, jak i w trybie autonomicznym (wyspowym).

3.1. Funkcje interaktywnego magazynu energii

Interaktywny magazyn energii pełni szereg funkcji związanych zarówno z magazynowaniem energii, jak i stabilizacją pracy lokalnego układu elektroenergetycznego.

Do podstawowych funkcji takiego układu należą bilansowanie mocy w lokalnym układzie energetycznym, stabilizacja parametrów jakości energii i buforowanie zakłóceń energetycznych. Wszystkie te działania mają na celu zwiększenie odporności infrastruktury krytycznej.

Bilansowanie mocy ma na celu wyrównywanie różnic pomiędzy produkcją energii, a zapotrzebowaniem na energię w danym obiekcie lub obszarze. Funkcja ta jest niezwykle istotna w przypadku źródeł odnawialnych, gdzie produkcja energii jest zmienna i zależna od warunków pogodowych. Magazyny energii mogą również stabilizować parametry pracy sieci elektroenergetycznej poprzez regulację napięcia oraz częstotliwości. Moduł ten jest szczególnie ważny w lokalnych systemach energetycznych pracujących w trybie wyspowym. Nadto magazyny energii mogą pełnić funkcję bufora energetycznego, absorbując krótkotrwałe zakłócenia w pracy systemu elektroenergetycznego, chroniąc wrażliwe urządzenia elektroniczne przed nagłymi zmianami parametrów zasilania.

Integracja magazynów energii z lokalnymi źródłami wytwórczymi pozwala na utrzymanie dostaw energii nawet w przypadku awarii sieci elektroenergetycznej. Dzięki temu możliwe jest zapewnienie ciągłości funkcjonowania infrastruktury krytycznej, takiej jak szpitale, systemy wodociągowe czy centra zarządzania kryzysowego.

3.2. Rola systemów zarządzania energią

Kluczowym elementem interaktywnego magazynu energii jest system zarządzania energią (Energy Management System – EMS), którego zadaniem jest koordynacja pracy poszczególnych elementów układu energetycznego. System ten umożliwia monitorowanie przepływów energii w czasie rzeczywistym oraz optymalizację pracy magazynów energii, źródeł wytwórczych oraz odbiorników energii.

Nowoczesne systemy zarządzania energią wykorzystują zaawansowane algorytmy sterowania oraz systemy komunikacji cyfrowej, które umożliwiają dynamiczne dostosowanie pracy układu energetycznego do zmieniających się warunków eksploatacyjnych. Zastosowanie takich systemów pozwala zwiększyć efektywność energetyczną, poprawia stabilność pracy sieci oraz ogranicza ryzyko awarii. Techniki optymalizacyjne pozwalają na maksymalizację mocy wyjściowej generatorów w danym momencie oraz zwiększenie żywotności systemów magazynowania energii. Pozwalają one również na minimalizację kosztów operacyjnych w danej sieci oraz zmniejszenie kosztów środowiskowych [García Vera i Bernal-Agustín, 2019].

3.3. Założenia krytyczno-strukturalne dla sieci interaktywnych magazynów energii

Projektowanie sieci interaktywnych magazynów energii dla infrastruktury krytycznej wymaga przyjęcia spójnych założeń organizacyjnych, technicznych i funkcjonalnych, uwzględniających bezpieczeństwo energetyczne oraz odporność systemu. Rozwój mikrosieci i hybrydowych systemów magazynowania wymaga integracji źródeł energii i zaawansowanego sterowania [Lund et al., 2017], [Lin i Wu, 2024]. Sieci te powinny uzupełniać system elektroenergetyczny i umożliwiać autonomiczne działanie w sytuacjach kryzysowych.

Założenie nr 1: Identyfikacja infrastruktury krytycznej

Identyfikacja kluczowych obiektów na wszystkich poziomach zarządzania (np. ochrona zdrowia, woda, transport, IT, administracja) jako podstawa planowania bezpieczeństwa. W Polsce regulowana m.in. przez programy ochrony infrastruktury (Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, 2023). Wg autorów niniejszego opracowania założenie to powinno zostać zrealizowane najpóźniej do 31. grudnia 2026 roku.

Założenie nr 2: Określenie zapotrzebowania na energię

Analiza potrzeb energetycznych (energia elektryczna, ciepło, chłód, paliwa) w różnych trybach pracy, w tym kryzysowych. Wg autorów niniejszego opracowania założenie to powinno zostać zrealizowane najpóźniej do 31. grudnia 2026 roku.

Założenie nr 3: Określenie interfejsów

Zdefiniowanie połączeń między systemem sieciowym a lokalnym (magazyny energii) oraz ich przepustowości.

Założenie nr 4: Określenie potencjału źródeł energii

Uwzględnienie lokalnych źródeł, w tym OZE, w celu zwiększenia elastyczności i odporności systemu.

Założenie nr 5: Cyberbezpieczeństwo

Uwzględnienie zabezpieczeń systemów sterowania i komunikacji (np. szyfrowanie, detekcja intruzów, redundancja) w celu ochrony przed cyberatakami.

3.4. Koncepcja 3-stopniowego niezależnego (autonomicznego) zasilania promieniowego opartego o interaktywne magazyny energii

Trzystopniowa architektura umożliwia elastyczne dostosowanie źródeł energii do aktualnego zapotrzebowania oraz stanu systemu. Taka struktura ma na celu minimalizację ryzyka awarii i ograniczeniu czasu przełączenia. Trzystopniowy system zasilania promieniowego jest sterowany przez zaawansowany system zarządzania energią, który umożliwia dynamiczne przełączanie pomiędzy trybami pracy w zależności od stanu sieci, dostępności źródeł energii oraz aktualnego zapotrzebowania odbiorców.

Stopień 1-szy (wysoko-prądowy) jest odpowiedzialny za zasilanie odbiorników o dużym poborze mocy oraz za uruchamianie kluczowych obiektów infrastruktury krytycznej. Źródła stosowane na tym poziomie charakteryzują się wysoką mocą chwilową i możliwością szybkiego reagowania na nagłe skoki zapotrzebowania w energię. Zatem zasilanie wysoko-prądowe musi być oparte o:

- silniki spalinowe i bloki prądowo-ciepłone zasilane ON, gazem ziemnym lub H_2 ,
- ogniwa paliwowe zasilane H_2 oraz czystym O_2 z elektrolizerów lub zbiorników H_2 i O_2 ,
- zestawy baterii kwasowych i/lub litowo-jonowych.

Stopień 2-gi (średnio-prądowy) - odpowiada za zasilanie odbiorników o umiarkowanym poborze mocy oraz wspomaga stabilizację parametrów napięcia i częstotliwości. W tym stopniu stosowane są technologie charakteryzujące się dobrą elastycznością, możliwością pracy ciągłej i łatwością integracji z lokalnymi źródłami energii odnawialnej. Stopień średnio-prądowy oparty jest o:

- ogniwa paliwowe zasilane H_2 oraz czystym O_2 z elektrolizerów lub zbiorników H_2 i O_2 ,
- zestawy baterii kwasowych i/lub litowo-jonowych.

Stopień 3-ci (nisko-prądowy) - przeznaczony jest do zasilania odbiorników o niskim poborze mocy, takich jak systemy sterowania, urządzenia monitoringu, oświetlenie awaryjne czy systemy komunikacji. Źródła stosowane w tym stopniu cechują się wysoką gęstością energii i możliwością długotrwałego podtrzymania pracy obiektu przy minimalnym zużyciu paliwa lub energii. Ten poziom zasilania wykorzystuje głównie zestawy baterii kwasowych i/lub litowo-jonowych, względnie małe turbiny wiatrowe lub ogniwa fotowoltaiczne.

Tego typu trójstopniowe zasilanie może pracować w różnych trybach: normalnym, awaryjnym i wyspowym. W trybie normalnym wszystkie stopnie współpracują z siecią energetyczną. W tym systemie wyższe stopnie mają za zadanie wspierać pokrycie szczytów mocy, natomiast niższe są odpowiedzialne za monitorowanie parametrów systemu i ew. wspomagają bilansowanie energii. W przypadku awarii częściowej sieci zewnętrznej interaktywny magazyn aktywuje stopnie wysoko- i średnio-prądowe. Stopień nisko-prądowy zapewnia wówczas podtrzymanie systemów krytycznych. Układ minimalizuje przerwy w dostawie energii i ogranicza ryzyko przeciążenia. W trybie wyspowym, przy całkowitym odłączeniu sieci elektroenergetycznej, cały układ działa autonomicznie. Wówczas stopień wysoko-prądowy uruchamiany jest w pierwszej kolejności, a stopnie średni- i nisko-prądowe stabilizują napięcie i częstotliwość. Interaktywny magazyn energii monitoruje wszystkie przepływy energii, zapewniając równowagę i optymalne wykorzystanie dostępnych źródeł.

4. STRUKTURA TECHNICZNA INTERAKTYWNEGO MAGAZYNU ENERGII

Konstrukcja interaktywnego magazynu energii opiera się na modularnej budowie, pozwalającej na integrację różnorodnych źródeł energii, systemów przetwarzania oraz magazynów energii. Struktura techniczna umożliwia zarówno absorpcję energii z zewnętrznych źródeł, jak i jej dystrybucję w formie elektrycznej, cieplnej lub chemicznej (wodór) (Rys. 1). Wejściowe strumienie energii obejmują tradycyjne oraz odnawialne źródła energii, które dostarczają energię do modułów przetwarzania. Jako źródło energii wykorzystuje się na tym etapie energię elektryczną z sieci elektroenergetycznej lub lokalnych generatorów, wykorzystywaną do bezpośredniego zasilania odbiorników lub ładowania magazynów energii. Dodatkowo pozyskiwać można energię z turbin wiatrowych i energię z instalacji fotowoltaicznych. Energia pozyskiwana z turbin wiatrowych jest źródłem energii charakteryzującym się zmiennością i wymaga adaptacyjnego zarządzania. Energia słoneczna umożliwia wykorzystanie energii odnawialnej w ciągu dnia i zmniejszenie obciążenia konwencjonalnych źródeł. Naddo na tym etapie wykorzystuje się wodór w formie magazynowanej chemicznie lub wytwarzanej lokalnie przez elektrolizery – stanowi on nośnik energii do ogniw paliwowych i silników spalinowych.

Za konwersję energii wejściowej do postaci elektrycznej, chemicznej lub cieplnej, gotowej do magazynowania lub bezpośredniego wykorzystania odpowiada moduł przetwarzania, w którym znajdują się silniki spalinowe, ogniwa paliwowe i elektrolizery. Silniki spalinowe konwertują paliwa gazowe (ON – olej napędowy, gaz ziemny, H₂) na energię elektryczną i ciepło. Służą one głównie do szybkiego pokrycia wysokiego zapotrzebowania. Ogniwa paliwowe przekształcają H₂ i O₂ w energię elektryczną z wysoką sprawnością i niską emisją; stosowane w trybie średnio- i niskoprądowym. Elektrolizery – przetwarzają energię elektryczną na wodór i tlen; umożliwiają magazynowanie energii w formie chemicznej i wspierają cykl pracy ogniw paliwowych. Baterie Li-ion, baterie kwasowe, zbiorniki H₂ pozwalają na gromadzenie energii w różnych formach, umożliwiając jej wykorzystanie w okresach szczytowego zapotrzebowania lub w trybie awaryjnym.

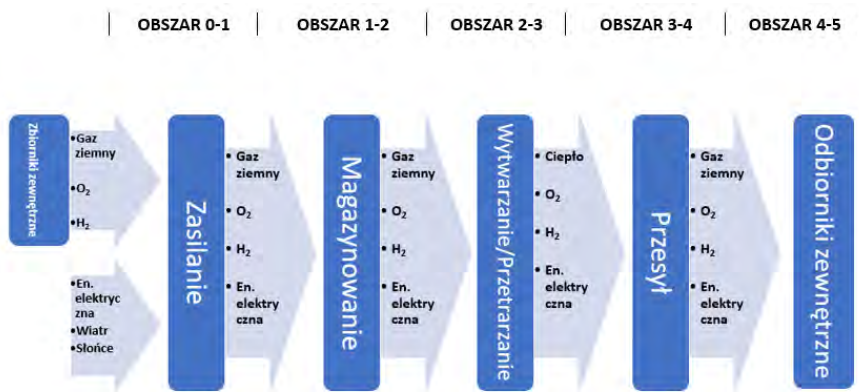
Finalną postać energii dostarczanej do odbiorników infrastruktury krytycznej, stanowią strumienie wyjściowe w postaci energii elektrycznej, ciepła lub wodoru.



Rys. 1. Schemat blokowy interaktywnego magazynu energii (opracowanie własne)

5. ŁAŃCUCH PRZEMIAN ENERGETYCZNYCH W OBSZARZE INTERAKTYWNEGO MAGAZYNU ENERGII

Łańcuch przemian energetycznych w interaktywnym magazynie energii obrazuje kolejność przetwarzania energii od źródeł po odbiorców końcowych, uwzględniając magazynowanie, konwersję, dystrybucję oraz integrację różnych nośników energii (Rys. 2). Podział systemu na obszary 0–5 pozwala zobrazować przepływy energii elektrycznej, chemicznej (H_2) i cieplnej oraz wskazać kluczowe punkty sterowania i magazynowania w systemie.



Rys. 2. Łańcuch przemian energetycznych w interaktywnym magazynie energii (opracowanie własne)

Obszar 0–1 obejmuje wszystkie wejściowe źródła energii, zarówno odnawialne, jak i konwencjonalne. Obszar 0-1 stanowi punkt początkowy łańcucha przemian energetycznych. Zawiera takie elementy jak:

- odnawialne źródła energii (OZE): instalacje fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe – które dostarczają zmiennej energii elektrycznej, wymagającej stabilizacji i buforowania,
- zbiorniki gazów: gaz ziemny, wodór (H_2) i tlen (O_2), które gromadzą paliwo dla silników spalinowych i ogniwo paliwowych,
- energia elektryczna z sieci: zapewnia stabilność systemu w trybach normalnym i awaryjnym.

Obszar 1-2 pozwala na gromadzenie energii w różnych formach w celu zapewnienia bufora energetycznego i elastyczności systemu. Zawiera następujące elementy:

- baterie litowo-jonowe i kwasowe – których zadaniem jest krótkoterminowe magazynowanie energii elektrycznej, zapewniające szybką reakcję na zmiany obciążenia.
- zbiorniki wodoru i tlenu – magazynowanie energii w formie chemicznej, przeznaczonej do późniejszej konwersji w ogniwoch paliwowych lub silnikach spalinowych.

Obszar 2–3 odpowiada za przetwarzanie zgromadzonej energii do postaci odpowiadającej potrzebom odbiorców. Można tu wyróżnić następujące elementy:

- silniki spalinowe i bloki prądowo-ciepłne – przekształcają paliwo gazowe w energię elektryczną i ciepło,
- ogniwa paliwowe – konwertują wodór i tlen w energię elektryczną o wysokiej sprawności,
- elektrolizery – wytwarzają wodór i tlen z energii elektrycznej, zamykając cykl chemiczny systemu.

Obszar dystrybucji 3-4 obejmuje przesył energii do odbiorców końcowych oraz sterowanie przepływem energii między stopniami zasilania i magazynami. Zawiera takie elementy jak:

- linie przesyłowe i rozdzielnice elektryczne,
- rurociągi i systemy przesyłu H_2 i gazów technologicznych,
- systemy zarządzania przepływem energii i bilansowaniem mocy (EMS).

Dystrybucja energii zapewnia, że odbiorniki krytyczne otrzymują stabilną energię elektryczną, ciepłą i chemiczną, a magazyny i źródła pozostają zsynchronizowane z aktualnym zapotrzebowaniem.

Obszar 4–5 stanowią odbiorcy końcowi czyli wszystkie elementy infrastruktury krytycznej, które korzystają z energii magazynowanej i przetworzonej w systemie.

6. WNIOSKI

Interaktywny magazyn energii oferuje szeroki potencjał wdrożeniowy w obszarach infrastruktury krytycznej, gdzie ciągłość zasilania jest kluczowa dla bezpieczeństwa i funkcjonowania państwa. System pozwala nie tylko na wsparcie energetyczne odbiorników o wysokim poborze mocy, ale także na zintegrowane zarządzanie energią w skali lokalnej i regionalnej. Do korzyści wdrożeniowych interaktywnego magazynu energii można zaliczyć redukcję awarii kaskadowych, zwiększenie odporności lokalnej i regionalnej nawet podczas blackout'u, gdyż systemy interaktywnych magazynów energii pozwalają obiektom działać autonomicznie w trybie wyspowym. Nadto integracja źródeł odnawialnych i magazynów energii chemicznej (H₂) umożliwia ograniczenie emisji CO₂ i zwiększenie udziału OZE w energetyce lokalnej. System zapewnia elastyczność i skalowalność, tzn. może być wdrażany stopniowo, zaczynając od wybranych obiektów krytycznych na poziomie gminnym, aż po pełną integrację regionalną.

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. Chowdhury, T., Chowdhury, H., Islam, K.S., Sharifi, A., Corkish, R. and Sait, S.M. 2023, Resilience analysis of a PV/battery system of health care centres in Rohingya refugee camp, *Energy*, 263(A), 125634. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125634>.
2. Chivunga, J.N., Lin, Z. and Blanchard, R., 2023, Power systems' resilience: A comprehensive literature review, *Energies*, 16(21), 7256. <https://doi.org/10.3390/en16217256>.
3. Lin, J.-H. and Wu, Y.-K., 2024, Review of power system resilience concept, assessment, and enhancement measures, *Applied Sciences*, 14(4), 1428. <https://doi.org/10.3390/app14041428>.
4. Rouholamini, M., Wang, C., Magableh, S. et al., 2025, Resiliency of electric power distribution networks: A review, *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 6, 39. <https://doi.org/10.1186/s43065-025-00154-y>.
5. García Vera, Y.E. and Bernal-Agustín, J.L., 2019, Energy management in micro-grids with renewable energy sources: A literature review, *Applied Sciences*, 9(18), 3854. <https://doi.org/10.3390/app9183854>.
6. Lund, H., Østergaard, P.A., Connolly, D. and Mathiesen, B., 2017, Smart energy and smart energy systems, *Energy*, 137, pp. 556–565.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Laprie, J.C., Kanoun, K. and Kaâniche, M., 2007, Modelling interdependencies between the electricity and information infrastructures. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security*. Berlin: Springer.

Rozporządzenia

Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz.U. 2007 Nr 89, poz. 590).

Komunikaty Internetowe

1. Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, 2023, Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej. Warszawa: RCB [komunikat internetowy] <https://www.gov.pl/web/rcb/narodowy-program-ochrony-infrastruktury-krytycznej> (dostęp: 27 lutego 2026).

INTERACTIVE ENERGY STORAGE – CONCEPTUAL PRINCIPLES**Abstract**

The aim of this article is to present the concept of interactive energy storage designed to power critical infrastructure, and to define its basic structural and functional principles. The article presents the possibility of supplementing the existing large-scale power grid with a local radial power supply based on interactive energy storage systems. This solution enables the high-current demand of critical infrastructure components and facilities to be met and increases their energy autonomy.

Keywords: interactive energy storage, critical infrastructure, energy resilience

Mariusz Figurski*
Rafał Niski*
Wojciech Żurawski**

POLSKA TARCZA PNT JAKO FUNDAMENT ODPORNOŚCI PAŃSTWA NA ZAKŁÓCENIA GNSS

Polska Tarcza PNT to strategiczny program wzmacniania odporności państwa na zakłócenia GNSS, które coraz częściej wpływają na transport, energetykę, telekomunikację i bezpieczeństwo (EUSPA 2023). Polska, położona w jednym z najbardziej narażonych regionów Europy, rozwija wielowarstwowy ekosystem obejmujący RTGMS, SOUKG i SMZSG, zapewniający wykrywanie, analizę i reakcję na zakłócenia w czasie rzeczywistym (Instytut Łączności 2024; POLSA 2023). Uzupełnieniem tej architektury jest system R-Mode, naziemny system wspomagający PNT odporny na jamming i spoofing (R-Mode Baltic 2022, ORMOBASS 2025). Program integruje kompetencje państwa, nauki i przemysłu, tworząc podstawy nowoczesnej, wieloźródłowej infrastruktury PNT kluczowej dla bezpieczeństwa i gospodarki cyfrowej.

Słowa kluczowe: GNSS, PNT, Polska Tarcza PNT, R-Mode

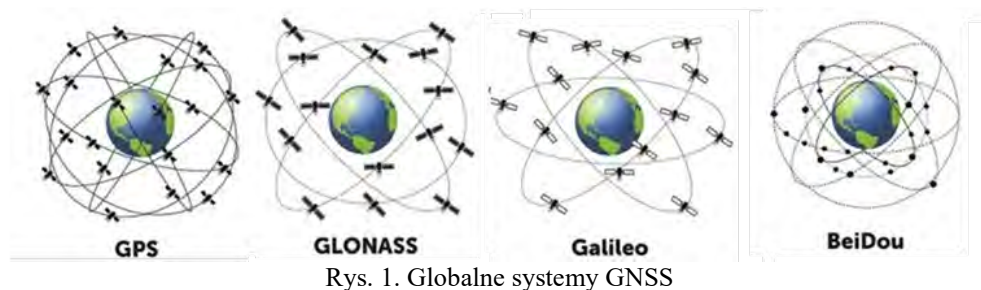
1. NIEWIDZIALNA INFRASTRUKTURA, OD KTÓREJ ZALEŻY WSPÓLCZESNY ŚWIAT

Współczesna cywilizacja opiera się na sygnałach, których nie widzimy, a które decydują o funkcjonowaniu niemal każdej dziedziny życia (ITU 2021). GPS i szerzej GNSS (rys. 1) stały się fundamentem transportu, energetyki, telekomunikacji, rolnictwa, logistyki, finansów, a nawet codziennych aplikacji, z których korzystają miliony ludzi (EUSPA 2023). W prezentacji otwierającej koncepcję Polskiej Tarczy PNT podkreślono, że technologia GPS/GNSS/PNT jest wpleciona w nasze życie

* Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy

** Ministerstwo Obrony Narodowej

społeczne i gospodarcze oraz decyduje o naszym bezpieczeństwie. To zdanie nie jest metaforą, lecz opisem rzeczywistości, w której funkcjonujemy.



Rys. 1. Globalne systemy GNSS

Obecnie Polska znajduje się w jednym z najbardziej narażonych regionów świata. Według dotychczasowych badań wynika, że ponad dwie trzecie terytorium kraju na wysokości przelotowej znajduje się w zasięgu środków zakłócających rozmieszczonych w Obwodzie Królewieckim (NATO STO 2022). Oznacza to, że zakłócenia GNSS nie są hipotetycznym zagrożeniem, lecz realnym i stale obecnym ryzykiem. Wystarczy niewielkie urządzenie, by sparaliżować fragment miasta, zakłócić działanie lotniska lub wywołać chaos w usługach cyfrowych. W opracowaniu zwrócono uwagę, że koszt budowy jammera to tylko kilkaset złotych, a hobbysta elektronik może go skonstruować w kilka godzin. Ta brutalna prostota sprawia, że zakłócenia GNSS stają się problemem cywilizacyjnym.

W odpowiedzi na to zagrożenie powstała Polska Tarcza PNT międzyresortowy program strategiczny, który łączy kompetencje państwa, nauki i przemysłu. Jednym z kluczowych elementów tej inicjatywy jest system RTGMS, czyli krajowy system monitorowania zakłóceń GNSS, rozwijany przez Instytut Łączności oraz Główny Urząd Geodezji i Kartografii stanowiący spójny ekosystem, który ma zapewnić Polsce odporność na zakłócenia sygnałów satelitarnych.

2. ZAKŁÓCENIA GNSS JAKO PROBLEM CYWILIZACYJNY

Choć sygnały GNSS są niewidoczne, to jednak ich rola w funkcjonowaniu współczesnego świata jest absolutnie fundamentalna. To dzięki nim samoloty mogą bezpiecznie lądować, statki utrzymują kurs na morzu, sieci energetyczne pozostają zsynchronizowane, a aplikacje w telefonach prowadzą nas do celu. Obecnie technologia GPS/GNSS/PNT jest wpleciona w nasze życie społeczne i gospodarcze oraz decyduje o naszym bezpieczeństwie. W praktyce oznacza to, że każde zakłócenie sygnału GNSS, nawet krótkotrwałe, może wywołać konsekwencje odczuwalne zarówno przez pojedynczych użytkowników, jak i przez całe sektory gospodarki. Zakłócenia GNSS można podzielić na naturalne i antropogeniczne (Dovis 2015; Figurski et al. 2011), przy czym te drugie dzielą się na niecelowe oraz celowe. Każdy

z tych typów ma inne źródła, dynamikę i skalę oddziaływania, ale wszystkie prowadzą do jednego, utraty wiarygodności sygnału, który jest podstawą współczesnej infrastruktury. W ostatnich latach, zwłaszcza po rozpoczęciu rosyjskiej inwazji na Ukrainę, obserwujemy gwałtowny wzrost liczby incydentów (Soreide et al. 2024) zakłóceń w Polsce i krajach sąsiednich. Skala tych zdarzeń rośnie niemal skokowo, co jednoznacznie wskazuje na ich związek z sytuacją geopolityczną.

Najbardziej spektakularne i jednocześnie najgroźniejsze są zakłócenia celowe. Jamming polega na nadawaniu sygnału radiowego o większej mocy w paśmie GNSS, co prowadzi do „zagłuszenia” sygnału satelitarnego (Dovis 2015). Odbiornik, który otrzymuje sygnał o zbyt niskim stosunku sygnału do szumu, przestaje poprawnie działać, co w praktyce oznacza utratę pozycji, błędne wskazania lub całkowity brak możliwości wyznaczenia współrzędnych (Figurski et al. 2011). Jamming (rys.2) jest techniką stosunkowo prostą z punktu widzenia fizyki fal radiowych, ponieważ sygnały GNSS docierają na Ziemię z ogromnych odległości i mają bardzo niską moc, dlatego nawet niewielkie źródło zakłóceń może skutecznie je zagłuszyć. Ta właściwość czyni jamming jednym z najczęściej obserwowanych typów zakłóceń, zwłaszcza w sytuacjach napięć geopolitycznych i działań hybrydowych.

Bardziej wyrafinowaną formą ataku jest spoofing (rys.2), czyli fałszowanie sygnału GNSS (Humphreys 2012; Psiaki & Humphreys 2016). W tym przypadku agresor nie zagłusza sygnału, lecz zastępuje go fałszywym, który imituje prawdziwy sygnał satelitarny. Odbiornik, nieświadomy manipulacji, zaczyna wyznaczać błędną pozycję, czas lub prędkość. Spoofing jest szczególnie niebezpieczny, ponieważ może prowadzić do sytuacji, w której użytkownik nie zauważa, że został zaatakowany.

Trzecią formą celowego zakłócania jest meaconing (rys.2), czyli przechwytywanie sygnału GNSS w jednym miejscu i retransmisja go z większą mocą w innym (Dovis 2015). To technika stosowana od lat w działaniach wojskowych, która może prowadzić do poważnych błędów nawigacyjnych. Meaconing jest trudniejszy do wykrycia niż jamming, ponieważ odbiornik nadal otrzymuje sygnał o poprawnej strukturze, lecz z opóźnieniem lub zniekształceniem.



Rys. 2. Rodzaje zakłóceń GNSS/PNT, jamming, spoofing, meaconing

Zakłócenia celowe mogą mieć dramatyczne skutki, ponieważ nawet pojedyncze źródło silnej interferencji potrafi sparaliżować funkcjonowanie systemów opartych na GNSS w dużym obszarze. Wystarczy nadajnik emitujący sygnał w paśmie nawigacyjnym, aby odbiorniki w promieniu wielu kilometrów przestały poprawnie wyznaczać pozycję lub całkowicie utraciły możliwość odbioru sygnału (Figurski et al. 2011). W środowisku miejskim taki incydent może doprowadzić do nagłego unieruchomienia aplikacji transportowych, błędów w nawigacji samochodowej, a nawet utraty kontroli nad dronami, które polegają na stabilnym sygnale satelitarnym. W przestrzeni powietrznej zakłócenia mogą ograniczyć dostępność sygnału na niskich wysokościach, co wpływa na procedury podejścia do lądowania i zwiększa ryzyko operacyjne. W skrajnych przypadkach zakłócenia mogą wywołać lokalny chaos informacyjny, prowadząc do dezorientacji użytkowników, opóźnień w ruchu i napięć społecznych. To pokazuje, że zakłócenia GNSS nie są jedynie problemem technicznym, a mogą nawet stać się narzędziem destabilizacji, jeśli zostaną wykorzystane w sposób celowy i skoordynowany.

Nie wszystkie zakłócenia sygnałów GNSS wynikają z działalności człowieka. W środowisku, w którym funkcjonują systemy satelitarne, istnieją również naturalne czynniki mogące wpływać na jakość odbioru. Kluczową rolę odgrywa tu zmienna aktywność Słońca oraz jej oddziaływanie z polem magnetycznym i atmosferą Ziemi. Rozbłyski słoneczne, koronalne wyrzuty masy oraz zmiany w strumieniu wiatru słonecznego mogą prowadzić do zaburzeń w jonosferze, przez którą przechodzą sygnały GNSS (ITU 2021).

Badaniem i predykcją naturalnych czynników, które wpływają na jakość odbieranych sygnałów z systemów satelitarnych wchodzi w obszar zainteresowania pogody kosmicznej, która opisuje warunki środowiskowe w przestrzeni kosmicznej, najczęściej w bezpośrednim otoczeniu Ziemi, które zmieniają się w odpowiedzi na aktywność Słońca i jej interakcję z magnetosferą oraz atmosferą naszej planety. Gdy dochodzi do silnych zaburzeń jonosferycznych, sygnały GNSS mogą ulegać opóźnieniom, zniekształceniom lub chwilowej degradacji jakości. W praktyce może to oznaczać wzrost błędów pozycji, problemy z wiarygodnością wyznaczanego czasu lub krótkotrwałe przerwy w odbiorze sygnału. Naturalne zakłócenia mogą być również wzmacniane przez szerokopasmowe emisje radiowe pochodzące z przestrzeni kosmicznej, które w pewnych warunkach nakładają się na pasma wykorzystywane przez systemy GNSS. Choć zjawiska te zwykle nie są tak gwałtowne jak celowe zakłócenia radiowe, stanowią jednak istotny element tła, które każdy system monitorowania jakości sygnału musi brać pod uwagę.

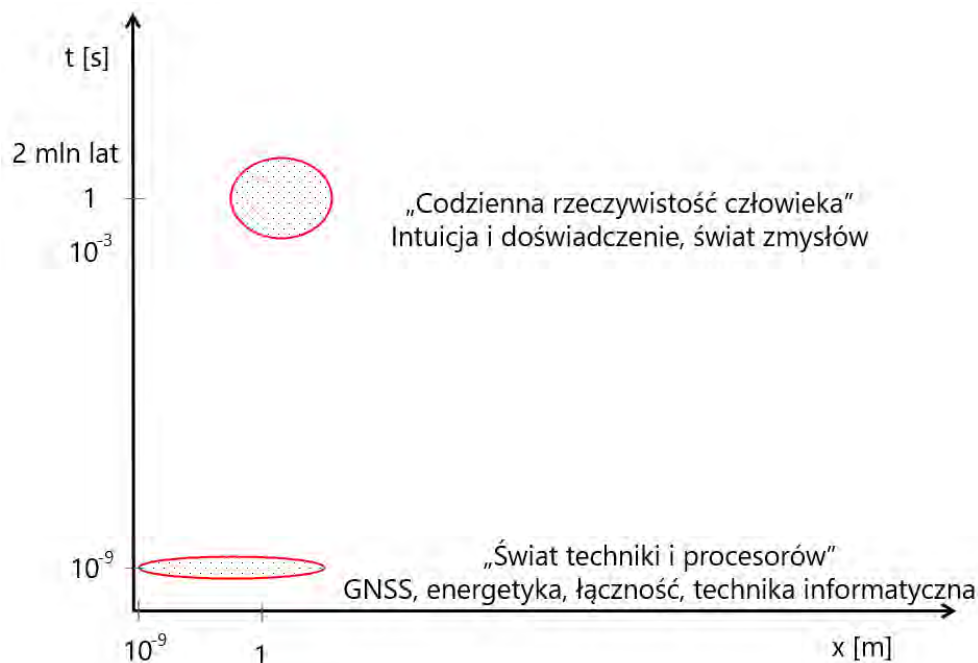
Wszystkie opisane zjawiska, zarówno naturalne, jak i wynikające z działalności człowieka, prowadzą do tego samego skutku: obniżenia wiarygodności sygnału GNSS. A ponieważ sygnał ten stał się fundamentem współczesnej infrastruktury, każde jego zakłócenie może wywołać konsekwencje odczuwalne w wielu obszarach życia. W ruchu lotniczym oznacza to wzrost ryzyka operacyjnego, w żegludze utrudnienia w prowadzeniu jednostek, w służbach ratowniczych opóźnienia w dotarciu na

miejsce zdarzenia, a w systemach autonomicznych utratę stabilności i precyzji działania. Nawet krótkotrwałe zaburzenia mogą wpływać na synchronizację czasu w sieciach telekomunikacyjnych i energetycznych, co z kolei może prowadzić do zakłóceń w usługach cyfrowych, transmisji danych czy pracy systemów finansowych.

W takiej rzeczywistości stały monitoring sygnałów GNSS staje się nie tyle udogodnieniem, ile koniecznością. Pojedyncze narzędzia dostępne publicznie, choć potrafią wskazać ogólne trendy lub lokalne anomalie, nie są w stanie zapewnić pełnego obrazu sytuacji ani dostarczyć danych o jakości wymaganej do podejmowania decyzji operacyjnych budowa wyspecjalizowanych systemów monitorowania, obejmujących swoim zasięgiem całe terytorium kraju i działających w czasie rzeczywistym, jest kluczowym elementem wzmacniania odporności państwa (Figurski et al. 2011). Tego typu rozwiązania pozwalają nie tylko wykrywać zakłócenia, lecz także analizować ich charakter, skalę i potencjalne źródła, co ma znaczenie zarówno dla użytkowników indywidualnych, jak i dla sektorów gospodarki, które w największym stopniu polegają na stabilnym sygnale GNSS.

3. UZALEŻNIENIE NATO I UE OD TECHNOLOGII PNT

Współczesna Europa i państwa NATO funkcjonują w świecie, w którym technologia PNT stała się jednym z filarów bezpieczeństwa i gospodarki. Choć dla przeciętnego człowieka użytkownika PNT kojarzy się głównie z nawigacją w telefonie, w rzeczywistości jest to infrastruktura krytyczna, od której zależy działanie niemal wszystkich sektorów nowoczesnego państwa. Wymaga podkreślenia, że funkcjonowanie nowoczesnej techniki, która zapewnia dostęp do usług krytycznych wymaga bardzo precyzyjnej synchronizacji (precyzyjnego czasu). Doświadczenie człowieka kształtuje nasze intuicje dla zupełnie innej części czasoprzestrzeni niż świat np. procesora komputera, techniki łączności, energetyki (rys. 3), dla człowieka synchronizacja na poziomie 1s a nawet 1 minuty jest w większości wystarczająca, natomiast zupełnie inne są wymagania procesorów, które to właśnie są głównymi użytkownikami technologii PNT ze szczególnym podkreśleniem T (Timing – Czas). Z kolei to właśnie procesory zapewniają sprawne funkcjonowanie systemów i infrastruktury krytycznej i usług kluczowych. Cały potężny system, na którym opiera się światowa logistyka, bankowość i wojsko, wisi na włosku, jakim jest utrzymanie synchronizacji czasu rzędu pojedynczych nanosekund czyli 10^{-9} s. Sukces technologii satelitarnych spowodował, że współczesne usługi PNT w tym oczywiście synchronizacja oparta została o technologie GNSS.



Rys. 3. Obszary czasoprzestrzeni w których funkcjonuje człowiek i nowoczesna technika

Europa korzysta dziś z czterech globalnych systemów GNSS. Amerykańskiego GPS, europejskiego Galileo, rosyjskiego GLONASS i chińskiego BeiDou (EUSPA 2023). Odbiorniki w smartfonach, pojazdach czy urządzeniach przemysłowych potrafią łączyć sygnały z wielu systemów jednocześnie, co zwiększa dokładność i odporność na lokalne zakłócenia. W efekcie zdecydowana większość Europejczyków korzysta z GNSS codziennie, często nie zdając sobie z tego sprawy. Nawigacja samochodowa, aplikacje transportowe, płatności elektroniczne, logistyka, rolnictwo precyzyjne, a nawet działanie bankomatów, wszystkie te usługi opierają się na stabilnym sygnale PNT.

Szczególnie istotnym elementem technologii PNT jest czas. Sygnały GNSS dostarczają precyzyjnych znaczników czasu z dokładnością rzędu nanosekund, co jest niezbędne do synchronizacji sieci komórkowych, serwerów internetowych, systemów energetycznych i infrastruktury finansowej. Bez tej synchronizacji nie działałyby stacje bazowe telefonii komórkowej, które muszą pracować w idealnym rytmie, aby zapewnić płynne przełączanie połączeń. Nie działałyby systemy bankowe, które wymagają precyzyjnego znacznika czasu przy każdej transakcji. Nie działałyby inteligentne sieci energetyczne, które muszą utrzymywać spójność fazową, aby uniknąć awarii. W tym sensie PNT jest niewidzialnym zegarem sterującym współczesną cywilizacją. NATO od lat traktuje PNT jako zdolność strategiczną (NATO STO 2022). Systemy satelitarne są wykorzystywane do nawigacji wojskowej, synchroni-

zacji systemów łączności, koordynacji działań, monitorowania ruchu wojsk i naprowadzania uzbrojenia. Zakłócenia PNT mogą prowadzić do utraty świadomości sytuacyjnej, błędów w nawigacji, a nawet do utraty kontroli nad systemami autonomicznymi. W środowisku działań militarnych, gdzie liczy się każda sekunda i każdy metr, stabilność sygnału PNT jest warunkiem skuteczności operacyjnej. Unia Europejska również dostrzega strategiczne znaczenie PNT. System Galileo został zaprojektowany jako niezależny od GPS, aby zapewnić Europie autonomię (European Commission 2023) w obszarze nawigacji satelitarnej. Jego sygnały charakteryzują się wysoką dokładnością i odpornością na zakłócenia, a dodatkowe usługi szyfrowane są przeznaczone dla służb bezpieczeństwa i instytucji państwowych. Mimo to nawet najbardziej zaawansowane systemy GNSS pozostają podatne na zakłócenia, zwłaszcza te generowane celowo. Dlatego UE wymaga od państw członkowskich budowy wieloźródłowych łańcuchów PNT, które łączą sygnały satelitarne z alternatywnymi źródłami pozycji i czasu, takimi jak systemy naziemne, zegary atomowe czy technologie hybrydowe. W praktyce oznacza to, że Europa i NATO są silnie uzależnione od stabilności sygnałów PNT, a każde zakłócenie może mieć efekt domina. W świecie, w którym coraz więcej urządzeń i systemów działa autonomicznie, a infrastruktura jest ze sobą ściśle powiązana, odporność na zakłócenia PNT staje się jednym z kluczowych elementów bezpieczeństwa państwa.

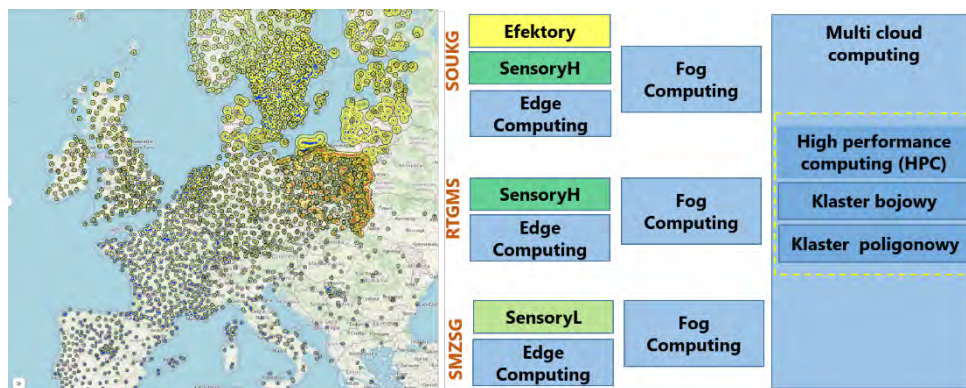
4. POLSKA TARCZA PNT – ZAŁOŻENIA, ARCHITEKTURA I SYSTEMY RDZENIOWE

Polska Tarcza PNT jest jedną z inicjatyw w obszarze bezpieczeństwa technologicznego i holistycznego cyberbezpieczeństwa. Jej celem jest stworzenie spójnego, wielowarstwowego systemu, który zapewni odporność państwa na zakłócenia sygnałów GNSS i zagwarantuje ciągłość działania usług zależnych od precyzyjnej pozycji, nawigacji i czasu. Program wyróżnia się tym, że łączy kompetencje wielu instytucji państwowych, środowisk naukowych i sektorów technicznych, tworząc ekosystem obejmujący zarówno cyberbezpieczeństwo, jak i technologie kosmiczne, geodezję, obronność oraz infrastrukturę krytyczną.

Tarcza PNT została zaprojektowana jako przedsięwzięcie międzyresortowe, w którym uczestniczą instytucje odpowiedzialne za cyfryzację, obronność, rozwój technologiczny, bezpieczeństwo wewnętrzne, geodezję, metrologię i nadzór telekomunikacyjny (NATO STO 2022). Tak szeroka współpraca wynika z faktu, że technologia PNT przenika wszystkie kluczowe obszary funkcjonowania państwa. Aby skutecznie chronić sygnały GNSS, nie wystarczy działanie jednego resortu, potrzebna jest koordynacja na poziomie strategicznym, operacyjnym i technicznym. Dlatego Tarcza PNT została pomyślana jako integralna część krajowego systemu holistycznego cyberbezpieczeństwa, a nie jako odrębny projekt funkcjonujący obok istniejących struktur.

Fundamentem Tarczy są trzy grupy zdolności, które odpowiadają trzem filarom nowoczesnej ochrony PNT (NATO STO 2022). Pierwszy z nich to zdolności rozpoznawcze, obejmujące wykrywanie, analizę i geolokalizację zakłóceń. Drugi to zdolności ochronne, czyli technologie i procedury, które mają zapewnić odporność systemów na zakłócenia, od anten odpornych na interferencje, przez zegary atomowe, po alternatywne źródła czasu i naziemne systemy nawigacyjne. Trzeci filar to zdolności ofensywne, pozwalające na neutralizowanie wrogich działań w obszarze PNT, co ma znaczenie zwłaszcza w kontekście współczesnych zagrożeń hybrydowych.

Choć Tarcza PNT jest nowym programem, nie powstaje w próżni. Jego siłą jest wykorzystanie i integracja systemów, które już istnieją i funkcjonują w Polsce (Tab. 1). Pierwszym z nich jest SOUKG, system monitorowania zakłóceń i wzmacniania nawigacji, który obejmuje zarówno komponenty lądowe, jak i morskie. Drugim jest RTGMS, krajowy system monitorowania sygnałów GNSS w czasie rzeczywistym, rozwijany przez Instytut Łączności i Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Jego zadaniem jest wykrywanie zakłóceń, analiza ich charakteru oraz generowanie alarmów, które mogą być wykorzystywane przez administrację, służby i sektor gospodarczy. Trzecim elementem jest SMZSG, system telemetryczny Polskiej Agencji Kosmicznej, który pozwala na identyfikację anomalii i rozproszenia sygnałów GNSS na dużą skalę.



Rys. 4. Architektura integracyjna Polskiej Tarczy PNT oraz potencjał skalowania

Każdy z tych systemów pełni inną funkcję, ale dopiero ich integracja tworzy spójny ekosystem zdolny do działania w skali całego kraju a nawet kontynentu (Rys. 4). Połączenie gęstej sieci sensorów, mobilnych platform pomiarowych, zaawansowanych algorytmów analitycznych i infrastruktury obliczeniowej o wysokiej wydajności pozwoli na stworzenie wielowarstwowej tarczy, która może wykrywać zakłócenia, analizować ich źródła, reagować na nie i zapewniać alternatywne źródła pozycji i czasu. Dzięki temu Polska Tarcza PNT staje się nie tylko systemem monitorowania,

lecz także narzędziem budowania odporności państwa na zakłócenia GNSS, zarówno te przypadkowe, jak i celowe.

W efekcie powstaje rozwiązanie, które może być skalowane na poziom europejski i sojuszniczy, wpisując się w potrzeby NATO i UE w zakresie ochrony technologii PNT. Polska, dzięki integracji istniejących systemów i rozwojowi nowych zdolności, ma szansę stać się jednym z liderów w obszarze bezpieczeństwa nawigacyjnego i czasu, oferując rozwiązania, które odpowiadają na wyzwania współczesnego świata.

Tabela 1

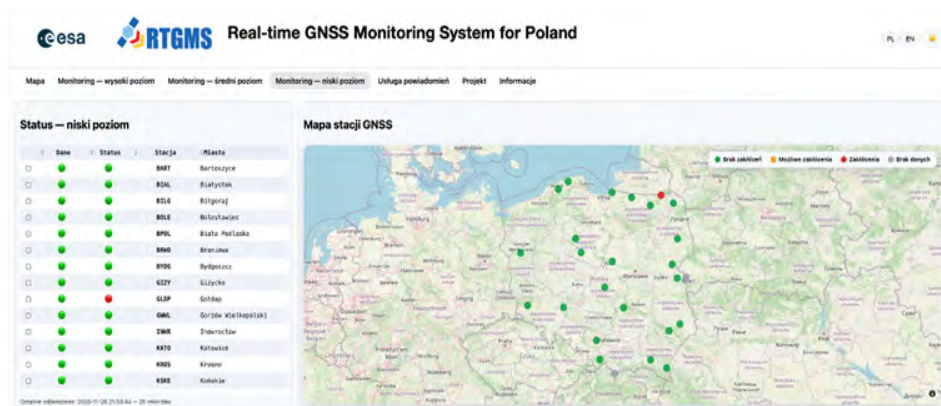
Synergia systemów rdzeniowych Polskiej Tarczy PNT

Aspekt synergii	SOUKG	RTGMS	SMZSG
Obszar działania	Południowy Bałtyk Wybrzeże	Obszar lądowy RP	Obszar lądowy RP
Sensory	Mała liczba, ale bardzo wysokiej czułości	Średnia liczba wysokiej czułości	Bardzo duża liczba sensorów, umiarkowanej czułości
Efektory	Tak	Tak (mobilny)	Nie
Komponent mobilny	Nie	Tak	Nie
Metoda detekcji ataków	Surowe Obserwacje dużej częstotliwości i widmo	Surowe obserwacje i widmo	Surowe obserwacje
Synchronizacja	Atomowe źródła częstotliwości, wzmacnianie e- CzasPL	Synchronizacja w ramach domeny ASG-EUPOS	eCzas PL
Dostęp do danych	Zespoły Polskiej Tarczy PNT	Portal publiczny	Portal publiczny
Resort	MON SGWP	MC/MG/MRiT IŁ-PIB, GUGiK	MG/MRiT POLSA

5. RTGMS – FILAR MONITOROWANIA ZAKŁÓCEŃ W POLSKIEJ TARCZY PNT

Real-time GNSS Monitoring System for Poland, czyli RTGMS (rys. 5), to rozwiązanie rozwijane przez Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, które w najbliższych latach stanie się jednym z kluczowych filarów Polskiej Tarczy PNT

(Instytut Łączności 2024). To pierwszy w Polsce, działający w czasie rzeczywistym system monitorowania zakłóceń sygnałów GNSS, obejmujący zarówno zjawiska przypadkowe, jak i celowe. To właśnie RTGMS ma dostarczać państwu i sektorom gospodarki informacji, które pozwolą reagować na incydenty zakłóceń zanim doprowadzą one do poważnych konsekwencji. W tym sensie system pełni rolę „zmysłu ostrzegawczego” całej Tarczy PNT warstwy, która wykrywa, analizuje i sygnalizuje zagrożenia, zanim te przerodzą się w kryzys.



Rys. 5. System RTGMS – serwis internetowy

RTGMS jest rozwijany przez Instytut Łączności we współpracy z Głównym Urzędem Geodezji i Kartografii. Jego konstrukcja opiera się na dwóch komplementarnych komponentach: części stacjonarnej oraz mobilnej. Część stacjonarna wykorzystuje istniejącą infrastrukturę ASG-EUPOS, czyli krajową sieć stacji referencyjnych GNSS, która od lat służy geodezji i precyzyjnemu pozycjonowaniu. Dzięki temu RTGMS nie musi budować sieci od zera, korzysta z rozbudowanej, sprawdzonej i stabilnej infrastruktury, którą można rozszerzyć o funkcje monitorowania zakłóceń. W ramach projektu wytypowano ponad dwadzieścia stacji, rozmieszczonych przede wszystkim w regionach najbardziej narażonych na interferencje, takich jak wschodnia granica kraju, okolice Obwodu Królewieckiego oraz obszar Zatoki Gdańskiej. To właśnie tam najczęściej obserwuje się anomalie sygnałów GNSS, dlatego te obszary stanowią naturalny punkt startowy dla pilotażowej sieci.

Drugim komponentem RTGMS jest MSP2G mobilna platforma pomiarowa, która pełni rolę terenowego laboratorium (rys. 6). MSP2G zostało wykonane na bazie samochodu dostawczego typu van, który został poddany profesjonalnej adaptacji, obejmującej m.in.: odpowiednią reorganizację wnętrza pojazdu, montaż podestu antenowego na dachu oraz masztu pomiarowego o wysokości ok. 10 m n.p.t. z kilkoma typami głowic pomiarowych, montaż dedykowanego systemu zasilania z różnych źródeł, zapewniającego autonomiczną pracę urządzeń MSP2G, montaż dedykowanego systemu klimatyzacji i ogrzewania wnętrza pojazdu oraz system monitoringu wizyjnego. Wysoko precyzyjny sprzęt pomiarowy zainstalowany w MSP2G

(zestaw anten, odbiorników, analizatorów widma i generatorów sygnałów), pozwala na prowadzenie zaawansowanych pomiarów na poziomie laboratoryjnym w miejscach, gdzie wystąpiły zakłócenia. MSP2G może działać zarówno zdalnie, jak i bezpośrednio na miejscu incydentu, co czyni go narzędziem nie tylko diagnostycznym, ale także walidacyjnym. Dzięki temu RTGMS nie ogranicza się do pasywnego monitorowania potrafi również weryfikować źródła zakłóceń, badać ich charakter i wspierać służby odpowiedzialne za bezpieczeństwo.



Rys. 6. Mobilny System Pomiarowy GNSS Galileo (MSP2G). Electronic Support (ES) i Electronic Attack (EA)

Centralnym elementem systemu jest architektura przetwarzania danych. RTGMS działa w modelu scentralizowanym: stacje monitorujące przesyłają strumień danych do centralnego serwera, gdzie uruchamiane są algorytmy wykrywania interferencji. Analiza obejmuje różne poziomy danych GNSS, od parametrów pozycji, przez dane obserwacyjne, aż po widma sygnałów. Najważniejszą rolę odgrywa analiza widmowa, ponieważ to właśnie w widmie najłatwiej wykryć charakterystyczne ślady zakłóceń, zarówno tych krótkotrwałych, jak i długotrwałych, zarówno słabych, jak i silnych (Błatnik & Batagelj 2025). Algorytmy RTGMS potrafią odróżnić naturalne fluktuacje od rzeczywistych incydentów interferencyjnych, a następnie generować alarmy, które mogą być prezentowane użytkownikom w czasie rzeczywistym.

Ważnym elementem systemu jest również warstwa wizualizacyjna. RTGMS udostępnia serwis internetowy, w którym użytkownicy będą mogli śledzić status stacji, przeglądać wykryte incydenty i analizować ich charakter. To narzędzie ma słu-

żyć nie tylko administracji państwowej, ale także sektorom gospodarki, które w największym stopniu polegają na stabilnym sygnale GNSS, lotnictwu, żegludze, telekomunikacji, energetyce czy logistyce.

Włączenie RTGMS do Polskiej Tarczy PNT sprawia, że system ten staje się jednym z jej fundamentów. To właśnie RTGMS dostarcza danych, które pozwalają ocenić skalę zagrożeń, identyfikować ich źródła i podejmować decyzje dotyczące ochrony infrastruktury krytycznej. W połączeniu z pozostałymi systemami SOUKG i SMZSG, będzie tworzył warstwę sensoryczną, która obejmuje zarówno monitoring szerokopasmowy, jak i precyzyjne analizy lokalne. Dzięki temu Polska Tarcza PNT zyskuje zdolność do działania w sposób ciągły, precyzyjny i odporny na zakłócenia, a RTGMS staje się jednym z jej najważniejszych elementów operacyjnych.

6. SYSTEMY SOUKG I SMZSG – FILARY BEZPIECZEŃSTWA NAWIGACYJNEGO W POLSCE

Polska Tarcza PNT będzie opierała się na kilku kluczowych systemach, które już dziś funkcjonują w kraju i stanowią fundament budowy odporności na zakłócenia GNSS. Wśród nich oprócz omówionego systemu RTGMS, szczególne znaczenie mają jeszcze dwa rozwiązania: SOUKG, czyli System Ochrony Usługi Krytycznej GPS/GNSS, oraz SMZSG, czyli System Monitorowania Zakłóceń Sygnałów GNSS (POLSA 2023). Oba systemy powstały w różnych instytucjach, mają odmienne zadania i architekturę, ale razem tworzą komplementarną warstwę bezpieczeństwa, która w przyszłości stanie się integralną częścią Polskiej Tarczy PNT.

SOUKG to system rozwijany od kilku lat jako odpowiedź na rosnące zagrożenia związane z zakłóceniami sygnałów nawigacyjnych. Jego celem jest nie tylko monitorowanie jakości sygnału GNSS, ale także wzmacnianie odporności nawigacji w sektorach, które wymagają najwyższej niezawodności. System obejmuje zarówno komponenty lądowe, jak i morskie (Morskie Farmy Wiatrowe), co ma szczególne znaczenie dla bezpieczeństwa żeglugi i osłony farm wiatrowych na Bałtyku. SOUKG integruje stacje pomiarowe, odbiorniki wysokiej klasy, systemy kompensacji błędów oraz efekторы, które mogą wspierać nawigację w sytuacjach zakłóceń. Dzięki temu system będzie w stanie nie tylko wykrywać anomalie, ale również dostarczać użytkownikom alternatywne dane nawigacyjne, co zwiększy odporność całej infrastruktury.

SOUKG jest rozwiązaniem o dużej złożoności technicznej. Wykorzystuje zaawansowane technologie obliczeniowe, w tym przetwarzanie brzegowe i chmurowe, aby analizować dane w czasie rzeczywistym. Jego architektura została zaprojektowana tak, aby mogła obsługiwać tysiące równoległych strumieni danych, co jest niezbędne w sytuacji, gdy system ma monitorować duże obszary i reagować na zakłócenia w sposób ciągły. Dzięki temu SOUKG stanowi jeden z najbardziej zaawansowanych elementów krajowej infrastruktury PNT.

Kolejnym kluczowym systemem jest SMZSG, rozwijany przez Polską Agencję Kosmiczną. To rozwiązanie telemetryczne, którego głównym zadaniem jest wykrywanie i monitorowanie zakłóceń sygnałów GNSS na terenie całego kraju. SMZSG wykorzystuje dużą liczbę prostych odbiorników rozmieszczonych w różnych lokalizacjach, co pozwala na tworzenie map zakłóceń i identyfikację obszarów szczególnie narażonych na interferencje. System analizuje zarówno parametry sygnału, jak i jego rozproszenie, co umożliwia wykrywanie zarówno zakłóceń celowych, jak i naturalnych.

SMZSG jest szczególnie wartościowy ze względu na swoją skalę i elastyczność. Dzięki dużej liczbie sensorów system może wykrywać zakłócenia o różnym charakterze od krótkotrwałych impulsów po długotrwałe anomalie. Dane zbierane przez SMZSG mogą być wykorzystywane zarówno przez administrację państwową, jak i przez sektor prywatny, który coraz częściej potrzebuje informacji o jakości sygnału GNSS w czasie rzeczywistym. System ten stanowi również ważne źródło danych dla analiz naukowych dotyczących propagacji sygnałów radiowych i wpływu zjawisk naturalnych na nawigację satelitarną.

Zarówno SOUKG, jak i SMZSG są projektami, które rozwijają się dynamicznie i mają potencjał, aby stać się kluczowymi elementami Polskiej Tarczy PNT. Ich integracja z RTGMS pozwoli stworzyć wielowarstwowy system monitorowania, w którym dane z różnych źródeł będą wzajemnie się uzupełniać. SOUKG dostarczy informacji o jakości nawigacji i alternatywnych źródłach pozycji, SMZSG zapewni szeroką obserwację zakłóceń, a RTGMS precyzyjną analizę widmową i zdolność do szybkiej reakcji. Razem stworzą system, który będzie w stanie wykrywać, analizować i neutralizować zagrożenia związane z zakłóceniami GNSS, a także wspierać rozwój krajowego przemysłu technologicznego.

7. SYSTEM R-MODE – NAZIEMNA ALTERNATYWA NAWIGACYJNA W ERZE ZAKŁÓCEŃ GNSS

R-Mode (ang. Ranging Mode) to jedna z najbardziej perspektywicznych technologii wspomagająca systemy pozycjonowania, rozwijana w Europie jako odpowiedź na rosnące zagrożenia związane z zakłóceniami systemów GNSS (rys. 7). Jego koncepcja polega na wykorzystaniu istniejącej infrastruktury radiowej, przede wszystkim morskich systemów łączności VHF oraz sieci nadajników MF DGPS do generowania sygnałów umożliwiających wyznaczanie pozycji i synchronizację czasu. Ponieważ R-Mode opiera się na nadajnikach naziemnych, jest znacznie bardziej odporny na jamming i spoofing niż sygnały satelitarne docierające z orbity.



Rys. 7. R-Mode (Ranging Mode) naziemny system wspomagający nawigację – Electronic Protection (EP)

Technologia R-Mode jest rozwijana w ramach projektów R-Mode Baltic, R-Mode Baltic 2 oraz ORMOBASS, realizowanych przez międzynarodowe konsorcjum instytucji z regionu Morza Bałtyckiego. Liderem technologicznym jest DLR German Aerospace Center (Niemcy), a w projekt zaangażowane są również: Instytut Łączności – PIB (Polska), instytucje bezpieczeństwa morskigo, administracje morskie i ośrodki badawcze ze Szwecji, Estonii i Finlandii oraz partnerzy infrastrukturalni z Polski, Szwecji i Norwegii. To szeroka współpraca państw bałtyckich, której celem jest stworzenie pierwszej w Europie operacyjnej sieci wspomagającej PNT opartej na sygnałach naziemnych.

Od strony technicznej R-Mode wykorzystuje modulację sygnałów VHF oraz sygnałów z nadajników MF DGPS, dodając do nich komponenty umożliwiające pomiar odległości i synchronizację czasu (R-Mode Baltic 2022, ORMOBASS 2025). Odbiornik może dzięki temu wyznaczyć pozycję metodą multilateracji, podobnie jak w systemach radiolokacyjnych. Największą zaletą R-Mode jest odporność na zakłócenia: sygnały naziemne mają znacznie większą moc niż sygnały GNSS, a ich zagłuszenie wymagałoby użycia znacznie silniejszych i bardziej złożonych urządzeń. Dodatkowo infrastruktura R-Mode jest rozproszona, łatwa do modernizacji i może

być instalowana na istniejących obiektach, takich jak latarnie morskie, maszty radiowe czy stacje brzegowe. Choć obecnie R-Mode koncentruje się na obszarach morskich, technologia ta ma ogromny potencjał rozwojowy. W przyszłości możliwe jest jej rozszerzenie na obszary lądowe, wykorzystując istniejące sieci nadawcze, systemy bezpieczeństwa publicznego czy infrastrukturę telekomunikacyjną. Taki krok pozwoliłby stworzyć naziemną warstwę PNT obejmującą cały kraj, odporną na zakłócenia GNSS i zdolną do działania w sytuacjach kryzysowych.

W erze narastających zagrożeń hybrydowych i coraz częstszych incydentów zakłóceń sygnałów satelitarnych, technologie alternatywne stają się niezbędnym elementem wieloźródłowych łańcuchów PNT. R-Mode idealnie wpisuje się w tę potrzebę, jest technicznie dojrzały, kompatybilny z istniejącą infrastrukturą i możliwy do wdrożenia na dużą skalę. W połączeniu z systemami RTGMS, SOUKG i SMZSG może stać się jednym z kluczowych elementów odporności państwa na zakłócenia GNSS, wzmacniając bezpieczeństwo nawigacyjne Polski i całego regionu Morza Bałtyckiego.

8. PODSUMOWANIE: BUDOWA ODPORNOŚCI PAŃSTWA W ERZE ZAKŁÓCEŃ GNSS

Polska wchodzi w etap, w którym bezpieczeństwo technologiczne staje się równie ważne jak bezpieczeństwo militarne czy energetyczne. Zakłócenia GNSS, jeszcze niedawno traktowane jako problem marginalny, dziś mają realny wpływ na funkcjonowanie transportu, telekomunikacji, energetyki, służb ratowniczych i całej infrastruktury cyfrowej. W świecie, w którym pozycja, nawigacja i czas są fundamentem nowoczesnych usług, państwo musi dysponować narzędziami pozwalającymi wykrywać zagrożenia, analizować ich charakter i reagować zanim doprowadzą do poważnych konsekwencji (EUSPA 2023; NATO STO 2022).

Polska Tarcza PNT oraz systemy RTGMS, SOUKG i SMZSG mogą w niedalekiej przyszłości tworzyć wspólnie odpowiedź na te wyzwania. Tarcza PNT integruje kompetencje wielu instytucji i łączy technologie z różnych dziedzin, od geodezji i telekomunikacji, przez cyberbezpieczeństwo, aż po systemy kosmiczne. RTGMS wnosi do tego ekosystemu zdolność ciągłego monitorowania sygnałów GNSS, analizowania ich jakości i wykrywania zakłóceń w czasie rzeczywistym. Połączone systemy stworzą wielowarstwową sieć sensoryczną, która pozwoli obserwować środowisko radiowe kraju z niespotykaną dotąd precyzją.

Jednak odporność państwa na zakłócenia GNSS nie może opierać się wyłącznie na monitorowaniu. Równie ważne jest posiadanie alternatywnych źródeł pozycji i czasu, które mogą przejąć funkcje nawigacyjne w sytuacji utraty sygnałów satelitarnych. W tym kontekście szczególne znaczenie zyskuje technologia R-Mode, rozwijana w regionie Morza Bałtyckiego przez konsorcjum instytucji z Niemiec, Polski, Szwecji, Finlandii, Norwegii i Estonii. R-Mode wykorzystuje naziemne nadajniki

VHF i DGPS, tworząc niezależną, odporną na zakłócenia warstwę PNT. W przyszłości system ten może zostać rozszerzony również na obszary lądowe, stając się jednym z kluczowych elementów wieloźródłowej architektury PNT w Polsce.

Budowa takiego ekosystemu to nie tylko kwestia bezpieczeństwa. To również impuls rozwojowy dla krajowego przemysłu technologicznego, instytutów badawczych i uczelni. Polska zyskuje szansę, by stać się jednym z liderów europejskich w dziedzinie ochrony PNT obszaru, który w najbliższych latach będzie miał kluczowe znaczenie dla funkcjonowania gospodarki cyfrowej i infrastruktury krytycznej.

Najważniejsze jest jednak to, że fundamenty są już gotowe. Istniejące systemy działają, nowe technologie są rozwijane, a współpraca między instytucjami nabiera tempa. Teraz potrzebna jest konsekwencja w realizacji projektu i utrzymanie strategicznego kierunku. Jeśli te warunki zostaną spełnione, Polska Tarcza PNT stanie się jednym z najważniejszych elementów krajowego systemu bezpieczeństwa rozwiązaniem, które pozwoli chronić państwo w erze, w której sygnały satelitarne są równie kluczowe jak energia, łączność czy infrastruktura transportowa.

LITERATURA

1. EU Agency for the Space Programme (EUSPA) (2023). GNSS Market Report, Issue 7. Prague: EUSPA. <https://www.euspa.europa.eu>
2. European Commission (2023). EU Space Programme – Galileo Public Regulated Service (PRS) Overview. Brussels: EC. <https://defence-industry-space.ec.europa.eu/defence-industry-space.ec.europa.eu> in Bing)
3. ITU Radiocommunication Sector (2021). Technical characteristics and protection criteria for radionavigation-satellite service. ITU-R M.1903. <https://www.itu.int>
4. Humphreys, T. (2012). Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer. *Journal of Navigation*, 65(1), 1–22. <https://doi.org/10.1017/S0373463311000501> (doi.org in Bing)
5. Psiaki, M. & Humphreys, T. (2016). GNSS Spoofing and Detection. *Proceedings of the IEEE*, 104(6), 1258–1270. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2526658> (doi.org in Bing)
6. Soreide, J. et al. (2024). Jammertest 2024 – Open-Air GNSS/PNT Resilience Campaign. Norwegian Communications Authority. <https://www.nkom.no>
7. Blatnik, A. & Batagelj, B. (2025). Evaluating GNSS Receiver Resilience under Controlled Interference. *Electronics*, 14(9), 1797. <https://doi.org/10.3390/electronics14091797>
8. DAVIS, F. (ed.) (2015). *GNSS Interference Threats and Countermeasures*. Artech House. <https://us.artechhouse.com>
9. Ranging Mode for the Baltic Sea, Ranging Mode Baltic Sea Test Bed Evaluation, Oficjalne strony projektów R-Mode Baltic i R-Mode Baltic 2, 2022, <https://r-mode-baltic.eu>

10. NATO STO (2022). Resilient PNT for Allied Operations. NATO Science and Technology Organization. <https://www.nato.int>
11. POLSA – Polska Agencja Kosmiczna (2023). SMZSG – System Monitorowania Zakłóceń Sygnałów GNSS. Raport techniczny. <https://polsa.gov.pl>
12. Instytut Łączności – PIB (2024). RTGMS: Real-Time GNSS Monitoring System for Poland – Dokumentacja techniczna. <https://il-pib.pl>
13. Figurski, M. et al. (2011). „GPS kontra zagłuszanie. Wpływ zakłóceń na pomiary GPS”. GEODETA, 1(188).
14. Operational R-Mode Baltic Sea System for Robust Maritime Traffic and New Maritime Applications, oficjalna strona projektu ORMOBASS, 2025, <https://interreg-baltic.eu/project/ormobass/>

POLISH PNT SHIELD AS THE FOUNDATION OF STATE RESISTANCE TO GNSS INTERFERENCE

Abstract

The Polish PNT Shield is a strategic program to strengthen the country's resilience to GNSS interference, which increasingly impacts transport, energy, telecommunications, and security (EUSPA 2023). Located in one of the most vulnerable regions in Europe, Poland is developing a multi-layered ecosystem encompassing RTGMS, SOUKG, and SMZSG, ensuring real-time detection, analysis, and response to interference (Institute of Telecommunications 2024; POLSA 2023). This architecture is complemented by the R-Mode system, a ground-based PNT support system resistant to jamming and spoofing (R-Mode Baltic 2022, ORMObASS 2025). The program integrates the competencies of the state, science, and industry, creating the foundations for a modern, multi-source PNT infrastructure crucial for security and the digital economy.

Keywords: GNSS, PNT, Polish PNT Shield, R-Mode

Andrzej GĘBURA *
Sławomir MICHALAK*
Tomasz TOKARSKI*
Tomasz GAJEWSKI*

MOBILNA POŁOWA STACJA ZASILANIA ELEKTROENERGETYCZNEGO JAKO ODNAWIALNE EKOLOGICZNE ŹRÓDŁO ENERGII

W artykule przedstawiono opracowany w ITWL* model mobilnej polowej stacji zasilania elektroenergetycznego (MPSZE) wykorzystującej odnawialne źródła do pozyskiwania i magazynowania energii elektrycznej. W prezentowanym rozwiązaniu podstawowym elementem jest zestaw elektrycznych baterii akumulatorowych. W MPSZE jako ekologicznym źródle energii istnieje możliwość ładowania jego zestawu baterii akumulatorowych z elastycznych bezodblaskowych paneli fotowoltaicznych albo ze źródeł wodorowych lub metanolowych, a alternatywnie również z agregatów prądotwórczych lub sieci przemysłowej. Przedstawiona w opracowaniu stacja o nazwie MPSZE-6, wyposażona jest w układ optymalizacji energii i falownik, może zasilać statki powietrzne napięciem $28,5 V_{DC}$ oraz realizować rozruchy o uderzeniu prądowym do 1200 A. Ponadto prezentowany model może zasilać napięciem $1 \times 230 V_{AC}$, 50 Hz, systemy radiowe lub zaplecze socjalne podczas rozśrodkowania, przy długotrwałej mocy 3 kVA i krótkotrwałe 6 kVA. Zaletą układu jest ograniczona emisja poświaty podczerwieni, hałasu, a jego wymiary i ergonomia sprawiają, iż jest łatwy do zamaskowania. W dzisiejszym świecie wojny, gdzie drony rozpoznawcze i satelity są w stanie wykryć każdy pojazd, takie urządzenie zasilania elektroenergetycznego może być cennym uzupełnieniem infrastruktury zasilania naziemnego zarówno dla wojsk lotniczych jak i lądowych w szczególności podczas rozśrodkowania.

Słowa kluczowe: panele fotowoltaiczne, przebazowanie, elektryczne zasilanie naziemne, prąd stały, prąd przemienny, falownik, źródła wodorowe, źródła metanolowe

* Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych (ITWL).

1. WPROWADZENIE

Oczywiste zalety użyteczności energii elektrycznej spowodowały, iż ma ona przewagę nad innymi formami energii. Do zalet tych należy:

- a) łatwość i wysoka sprawność przemiany energii elektrycznej w dowolną inną energię (mechaniczną, akustyczną, magnetyczną, elektromagnetyczną, ciepłą),
- b) szybkość działania (impuls elektryczny ma prędkość światła $c = 3 \cdot 10^8$ m/s),
- c) możliwość zapewnienia miniaturyzacji i kształtowania przestrzennego,
- d) łatwość odseparowania od niebezpiecznych dla człowieka zjawisk np. obszarów o wysokiej temperaturze, czynników chemicznych lub biologicznych,
- e) prawie natychmiastowa gotowość do działania.

Zastosowanie energii elektrycznej spowodowało, że w potocznym życiu cywilnym w szczególności w infrastrukturze wielkich miast nie wyobrażamy sobie dzisiaj bez niej ich funkcjonowania. Awaria sieci energetycznych w dużym mieście jest porównywalna do kataklizmu. Pierwsza elektrownia na prąd stały została skonstruowana i uruchomiona przez Tomasza Edisona w Nowy Jorku w 1882 r., a pierwszą elektrownię na prąd przemienny w 1895 r. skonstruował i uruchomił na rzece Niagara Nikola Tesla.

Wykorzystanie energii elektrycznej w zastosowaniach wojskowych na początku dotyczyła prawie tylko głębokiego zaplecza frontu m.in. do zasilania infrastruktury szpitali, zakładów remontowych itp. W operacjach frontowych pierwsze zastosowanie elektryczności było ograniczone do użycia baterii elektrycznych. Tak zasilano telegrafię do przekazywania rozkazów w wojnie krymskiej 1853 r. oraz wojnie secesyjnej w USA w 1861 r. Następnie wykorzystano ją w łączności radiowej oraz do oświetlania pojazdów i wojskowej sygnalizacji świetlnej.

Wieloletnie zaangażowanie państw NATO w operacje antyterrorystyczne sprawiły, że wsparcie logistyczne ukierunkowane było na zabezpieczenia operacji wojskowych daleko od stałych baz materiałowych [Daroszewski 2024]. Równoległe ze wzrostem zapotrzebowania na paliwa płynne niezbędne do napędu maszyn bojowych wzrastało zapotrzebowanie sił zbrojnych na energię elektryczną [Mikutel 2024]. Wynikało to przede wszystkim z rozwoju środków łączności, ale również pierwszych systemów radiolokacyjnych zwłaszcza dalekiego zasięgu, zużywających znaczne ilości energii elektrycznej. Obecnie dostawy energii elektrycznej dla sił zbrojnych są jednym z kluczowych (obok paliw płynnych oraz amunicji) czynników decydujących o powodzeniu operacji militarnych [Mikutel 2024].

2. WYZWANIA STAWIANE DLA EKOLOGICZNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W ZASTOSOWANIACH WOJSKOWYCH

2.1. Informacje wstępne

Pomimo rosnącej roli elektryczności w wojsku nadal dominują urządzenia mobilne oparte o silniki spalinowe. Są one jednak łatwe do wykrycia z powodu wysokiego poziomu natężenia dźwięku i bardzo wysokiej poświaty termicznej (temperatura układu wydechowego około 300 °C i więcej). Natomiast rozciągnięte konwoje dostarczające paliwo drogą lądową stanowią szczególnie łatwo wykrywalny i efektywny w niszczeniu cel, unieruchamiając tym samym wiele pojazdów na froncie, a tym samym uniemożliwiając skuteczną realizację planowanych działań. Tymczasem nowe środki rozpoznania, nowe systemy łączności radiowej (niezbędnej w nowoczesnym dowodzeniu) wymuszają coraz wyższe poziomy mocy dostarczanej energii elektrycznej oraz zapewnienia jej jakości. Komplikuje to i wydłuża logistykę zaopatrzenia w paliwa płynne, bo nadal zasilane są przeważnie z stacjonarnych agregatów prądotwórczych. Jednocześnie rośnie zapotrzebowanie na energię elektryczną dla żołnierzy piechoty. Zgodnie z licznymi opracowaniami [Łukowski 2024], wyposażenie żołnierzy brygadowych zespołów zadaniowych piechoty w inteligentne gogle powoduje, że każdy z nich będzie zużywał w ciągu doby trzy przenośne baterie akumulatorowe. Grupa 10 żołnierzy do ładowania swoich baterii potrzebuje 4,5 kWh dziennie. Jest to tylko niewielki przykład jak rozwijająca się technika zwiększa zapotrzebowanie energetyczne niezbędne do wykonania stawianych zadań. Zdaniem autorów można takie baterie ładować przy pomocy małej polowej mobilnej stacji zasilania elektroenergetycznego (MPSZE) zasilanej z ekologicznych źródeł energii [Gębura A., Michalak S. i inni 2023].

Kolejnym zastosowaniem MPSZE może być zapewnienie rozruchów i zasilanie naziemnych systemów pokładowych samolotów i śmigłowców w czasie wykonywania sprawdzeń poprawności działania systemów pokładowych, tj. wykonywania standardowych obsług bieżących lub okresowych. Dotyczy to przede wszystkim samolotów i śmigłowców bojowych w czasie ich:

1. Rozśrodkowania;
2. Zasilania na drogowych odcinkach lotniskowych;
3. Wykonywania obsług lub zapewnienia gotowości startowej statku powietrznego (m.in. zasilanie klimatyzacji) na wysuniętych punktach obsługowych [Lubiejewski 2018].

Ponadto MPSZE może być przydatny dla prowizorycznych punktów opatrunkowych lub niewielkich obozowisk do zasilania infrastruktury socjalnej.

Badania MPSZE wersji 6 wykazały, że stacje te mogą być przydatne do obsługi odbiorników o długotrwałej mocy zasilania do 3 kVA (krótkotrwałej 6 kVA) oraz do

zasilania infrastruktury naziemnej lądowisk (np. zasilanie radiolatarni lub systemu oświetlenia „Moskito”) [Gębura A. Michalak i inni 2023].

2.2. Możliwości zastosowania MPSZE w warunkach rozśrodkowania śmigłowców

Przebazowanie i rozśrodkowanie śmigłowców bojowych to kluczowe elementy taktyki lotniczej, mające na celu zwiększenie przeżywalności maszyn na polu walki, szczególnie w obliczu zagrożenia ze strony systemów napadu powietrznego wroga. Śmigłowce są rozmieszczane na wielu, często zamaskowanych i improwizowanych lądowiskach, co utrudnia ich wykrycie i zniszczenie. I tu napotykamy na trudności logistyczne, bo takie mini-lądowiska są często w znacznej odległości od siebie, a mobilne układy naziemnego zasilania (LZE) [Tokarski *Energies* 2025, 18(8), 1945; <https://doi.org/10.3390/en18081945>, 2025] muszą przemierzać wiele kilometrów pomiędzy nimi demaskując lokalizację sprzętu latającego [Lubiejewski 2018]. Śledzenie takiego pojazdu jest tym łatwiejsze np. przez drony rozpoznawcze nieprzyjaciela, że pojazdy te są napędzane silnikami diesla o znacznej poświacie cieplnej i wibroakustycznej. Dochodzi tu sprawa logistyki, ponieważ silniki spalinowe muszą mieć dostarczane paliwo, a dostarczanie materiałów pędnych i smarów oraz części zamiennych to dodatkowy sznur dostaw na samochodach z silnikami z emisją ciepłą. Ponadto istnieje sprawa zaplecza gospodarczego takiego mini-lądowiska i związane z nimi potrzeby zasilania w energię elektryczną. Problem ten mogą rozwiązać lokalne MPSZE oparte na niskoemisyjnych (niski współczynnik odbicia światła i niski współczynnik emisji podczerwieni) zasilane w dzień z elastycznych paneli fotowoltaicznych [Gębura 2024; Khawla Chaoui 2024; Michalak 2024; Maleczek 2018; Szczepaniak Maleczek 2015; Mroziński Flizikowski 2016; Tytko 2015; Marszałek 2014; Wojciechowski 2013; Lewandowski 2006] a w nocy z lekkich i wysokowydajnych baterii litowo-jonowych [Czerwiński 2016; Li Qi 30114] alternatywnie z ogniwa wodorowego lub metanolowego [Gawinowski 2022; Adamiec 2018; Ciechanowicz 2015; Jankowski 2012; Bujło 2007; Lewandowski 2006; Małek 2010; Ogulewicz 2010; Kobyłecki 2008].

2.3. Możliwości zastosowania MPSZE na drogowych odcinkach lotniskowych

Drogowy odcinek lotniskowy (DOL) [<https://zbiam.pl/artykuly/drogowe-odcinki-lotniskowe/>] to odcinek drogi publicznej przeznaczony na lotnisko polowe w czasie działań wojennych. Jako pierwsi wybrane odcinki dróg publicznych jako lotniska polowe próbowali wykorzystywać Niemcy, co miało miejsce w ostatnich miesiącach II wojny światowej w Europie. Obecnie coraz dłuższe linie autostrad sprzyjają maskowaniu potencjalnych miejsc lądowań. Nie ma tam infrastruktury lotniskowej, schronochangarów, dlatego muszą być rozmieszczone środki radiowego

naprowadzania (co najmniej dwie radiolatarnie kierunkowe, układ wskazywania ścieżki schodzenia typu ILS lub „Moskito”, reflektory oświetlenia pasa, rozruszniki elektryczne (LZE) na podwoziu mobilnym [Tokarski *Energies* 2025, 18(8), 1945; <https://doi.org/10.3390/en18081945>, 2025] i wiele środków wsparcia i zaopatrzenia, a ich montaż i ruch na danym odcinku autostrady może zdemaskować rejon lądowania. Częściowo można to zneutralizować poprzez wykorzystanie do ich zasilania zamaskowanych MPSZE.

2.4. Inne możliwości zastosowania MPSZE

Aktualne informacje pozyskiwane przez Autorów z terenów walk m.in. na Ukrainie sugerują, że czas powrócić do idei zasobników energii elektrycznej ładowanych ze źródeł odnawialnych, gdyż [Łukowski Kępczyński 2024]:

- nie generują one poświaty cieplnej,
- są łatwe do przebazowania,
- są zawsze gotowe do natychmiastowego zastosowania,
- mają mniejsze oscylacje elektryczne przy stanach przejściowych i niższy poziom zakłóceń promieniowanych przy stanach ustalonych,
- mają zwiększone możliwości maskowania termicznego i radiowego.

Obecne środki napadu powietrznego są tak rozbudowane, iż w sposób znaczący poprawiły swoją precyzję odnajdywania i niszczenia celów, co wymusza konieczność rozśrodkowanie statków powietrznych oraz maskowanie termiczne i radiowe środków i sprzętu je obsługujących w czasie rozśrodkowania w tym źródeł ich zasilania.

Na przykład ukraińskie drony FPV korzystające z naziemnych stacji ładowania wyposażonych w fotowoltaikę [<https://biznesalert.pl/slonce-nad-polem-bitwy-rosja-i-ukraina-zasilaja-drony-energia-sloneczna/>], są maskowane i zdalnie sterowane – ich dachy otwierają się tylko na czas startu maszyny. To rozwiązanie pozwala na bezpieczne ładowanie zarówno elektroniki, jak i głównych akumulatorów dronów, bez ryzyka dekonspiracji. Tego rodzaju „mobilne elektrownie” działają jak ciche zaplecze frontowe, trudne do zlokalizowania i zneutralizowania.

Również bardzo ważnym jest zapewnienie zasilania podczas konfliktu zbrojnego ludności cywilnej. Prawo wojenne co prawda zabrania atakowania obiektów niezbędnych do przetrwania ludności [Chrząśniak 2021], w tym elektrowni i sieci przesyłowych, lecz konflikt na Ukrainie (2022) pokazuje, że infrastruktura energetyczna jest często celem, co prowadzi do zakłóceń w systemach: chłodzenia żywności, funkcjonowania punktów medycznych, ogrzewania miejsc dyslokacji uchodźców. Ponadto zasilanie elektryczne jest bardzo istotnym elementem do wspomaganie akcji ratowniczych i ewakuacyjnych [Szczepaniak 2013]. Dlatego MPSZE może być również swoje zastosowanie do celów pozamilitarnych np. do zasilania szpitali polowych, zasilania aparatury specjalistycznej (w tym oświetlenie miejsca) podczas

ogłędzin miejsc przestępstw o charakterze terrorystycznym, zasilania maszyn i urządzeń oraz zasilanie infrastruktury obozów dyslokacji ludności w czasie klęsk żywiołowych np. trzęsień ziemi.

3. KONSTRUKCJA MPSZE

3.1. Założenia konstrukcyjne MPSZE

Proponowane w niniejszym opracowaniu systemy mobilnej stacji elektrycznego MPSZE w zależności od przeznaczenia mogą mieć dwa rodzaje konstrukcji [Michalak 2024]:

- „Lekką” o mocy do 6 kVA dla eskadr lotnictwa taktycznego oraz urządzeń łączności o niewielkiej mocy przeznaczoną głównie do transportu drogą powietrzną, złożoną z szybko-rozłącznych modułów o masie poniżej 30 kg, która zapewni energię elektryczną statkom powietrznym w czasie przebazowania i rozśrodkowania;
- „Ciężką” o mocy powyżej 15 kVA - dla układów radiolokacyjnych i systemów wojsk łączności - przeznaczoną głównie do transportu drogą kołową, złożoną z szybko-rozłącznych modułów o masie około 1200 kg zabudowanych na przyczepie samochodowej.

Zestaw „Lekkiej” mobilnej stacji zasilania powinien być wyposażony w:

- zestaw akumulatorowy (litowo-jonowy) o pojemności łącznej 400 Ah z kablem wydawczym SZRAP-500 i falownikiem 3 kVA, 230 V, 50 Hz oraz zestaw 8 paneli fotowoltaicznych z możliwością ich rozkładania i maskowania w terenie w znacznej odległości od zasilanych systemów,
- źródło paliwowa metanolowego (DMFC) na osobnym wózku, tworzącego moduł z autonomiczną baterią akumulatorową (200 Ah, 48 V), wyposażone w falownik o mocy 1,5 kVA, 230 V, 50 Hz do zasilania lokalnych niewielkich urządzeń łączności lub urządzeń socjalnych oraz w kabel do doładowywania akumulatorów zestawu akumulatorowego o pojemności 400 Ah (litowo-jonowego).

Zestaw „Ciężkiej” mobilnej stacji zasilania powinna być wyposażony w:

- modułowy zestaw akumulatorowy (litowo-jonowy) o pojemności łącznej 4200 Ah, wyposażony w falownik 15 kVA, 50 Hz, 230 V w każdym module,
- trzy zestawy paneli fotowoltaicznych po 8 paneli w każdym zestawie o łącznej mocy 10320 W,
- zestaw trzech źródeł metanolowych (DMFC) z falownikiem o łącznej mocy 4,5 kW.

Podstawowym przeznaczeniem konstrukcji MPSZE umożliwiającej pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych jest, możliwość zasilania śmigłowców i systemów łączności oraz infrastruktury logistycznej w czasie rozśrodkowania w warunkach polowych realizowanego przy zminimalizowanej poświacie termicznej z zachowaniem maskowania elektromagnetycznego i optycznego [Gębura Michalak i inni 2023].

Podstawowe wymagania (docelowe) dla zestawu „lekkiego” MPSZE:

- 1) zapewnienie zasilania naziemnego wojskowych statków powietrznych oraz naziemnych systemów łączności przez lekki, łatwo-demontowany system polowy oparty na trzech wzajemnie uzupełniających się głównych źródłach energii elektrycznej: ogniwach fotowoltaicznych, ogniwach metanolowych i magazynach energii elektrycznej (bateriach akumulatorowych),
- 2) możliwość przewożenia istniejącymi w wojsku RP pojazdami kołowymi i transportem lotniczym-m.in. możliwość transportu (po rozmontowaniu modułów systemu) w śmigłowcu,
- 3) spełnienie wymagań jakości energii elektrycznej: NO-17-A206:2019; ISO-6858; PN-ISO 8528-5; PN-ISO 8528-3,
- 4) możliwość demontażu/montażu systemu w ciągu 2 godzin-wyposażenie w złącza szybko-rozłączne,
- 5) możliwość przenoszenia bloków przez dwóch żołnierzy - masa bloku nie większa niż 30 kg zaopatrzenie w odpowiednie uchwyty,
- 6) maskowanie wibroakustyczne,
- 7) maskowanie radiowe,
- 8) maskowanie termiczne z założeniem, iż poziom podczerwieni nie będzie wyższy od promieniowania wydzielanego przez człowieka,
- 9) maskowanie optyczne.

Pierwowzorem MPSZE był akumulatorowy wózek rozruchowy produkowany do 1990 r. przez Wojskowe Zakłady Motoryzacyjne WZMot-4 we Wrocławiu (rys. 1). Był to prosty w konstrukcji i eksploatacji zasobnik energii elektrycznej oparty na czterech 12 V akumulatorach (czołgowych) typu 6SE190SEL o pojemności łącznej 340 Ah.



Rys. 1. Akumulatorowy wózek rozruchowy St-5M: a) widok ogólny; b) tabliczka wytwórcy

Przy konstruowaniu MPSZE uwzględniono m.in.:

1. Materiały i podzespoły urządzenia powinny pochodzić z krajowej produkcji lub z bliskich geograficznie krajów sojuszniczych według [Mroziński 2016] na rynku polskim spada wyraźnie ilość podzespołów azjatyckich na korzyść niemieckich i częściowo polskich;
2. Zestaw MPSZE powinien mieć wysoki poziom możliwości maskowania: niską poświatę cieplną, niski poziom emisji promieniowania elektromagnetycznego, w konstrukcji zaproponowano w jednostce centralnej przy wyjściu z falownika filtr przeciwsobny [Izydorczyk Konopacki 2003], który powoduje, iż zakłócenia impulsowe zdudniają się wzajemnie,
3. Zestaw paneli miał być w znacznej odległości ($30 \div 100$ m) od jednostki centralnej w związku z tym ich rozpoznanie i zniszczenie przez przeciwnika nie spowoduje odcięcia zasilania elektrycznego z jednostki centralnej - kabel połączeniowy o napięciu 8×40 V_{DC} gwarantuje niską masę i brak promieniowania.
4. Baterie stanowiące magazyn energii elektrycznej powinny być bardzo lekkie np. litowo-jonowe, które charakteryzują się czterokrotnie niższą masą od baterii kwasowo ołowiowych. Baterie te po licznych problemach w okresie wdrożenia ich do eksploatacji w czasie wprowadzenia ich do zasilania odbiorników mocy (elektronarzędzi na pokłady samochodów, statków powietrznych) [https://www.BOEING.COM/NEWS/Frontiers/Archive/2008/MAY/TS_SF04.PDF], obecnie dzięki zastosowaniu ich wentylacji, chłodzenia i zastosowaniu elektroniki sterującej, stają się stosunkowo bezpiecznymi i bardzo lekkimi magazynami energii elektrycznej [Czerwiński 2016, Mroziński 2016].

3.2. Konstrukcja MPSZE-6

W konstrukcji MPSZE-6 jednostkę centralną stanowi akumulatorowy wózek rozruchowy stanowiący magazyn energii elektrycznej. Jednostka centralna (Akumulatorowy wózek rozruchowy) jest zaopatrzona w diagnostykę wewnętrzną i system sterowania. Widok ogólny MPSZE-6 przedstawiono na rys. 2.

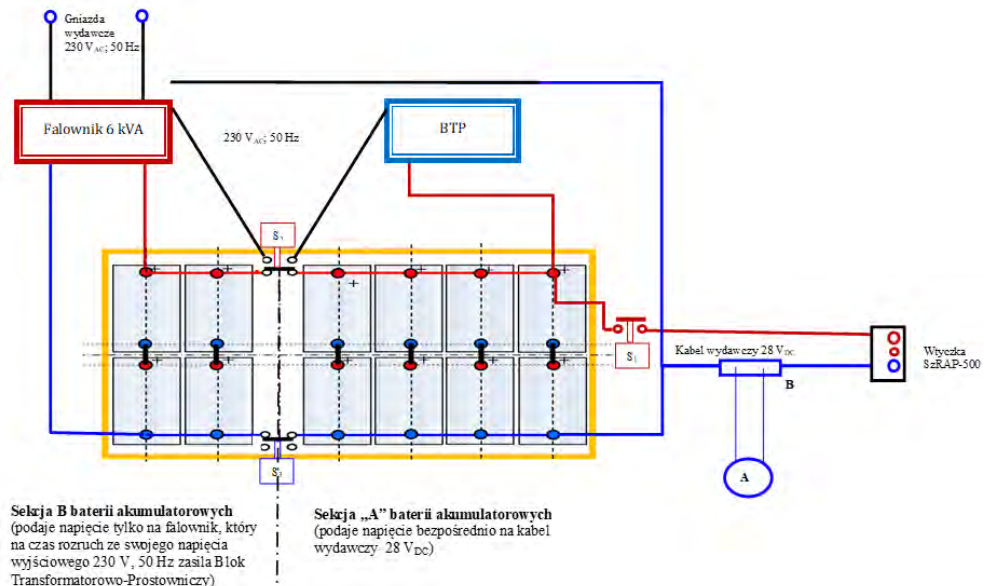


Rys. 2. Widok ogólny MPSZE-6 – wózek rozruchowy: 1 – korpus wózka rozruchowego; 2 – koło jezdne (koło przednie ze śmigłowca Mi-2); 3 – wtyczka SzRAP-50 na końcu kabla wydawczego prądu stałego; 4 – pokrywa wózka rozruchowego; 5 – wskaźniki cyfrowe: moc czynna/bierna, współczynnik mocy; 6 – mierniki wychyłowe (woltomierz/amperomierz prądu stałego); 7 – kratka kanału wentylacyjnego; 8 – centralny włącznik; 9 – kabel do połączenia jednostki centralnej z panelami fotowoltaicznymi

Głównymi elementami wyposażenia mobilnej polowej stacji zasilania elektrycznego w wariantcie 6 są [Gębura A., Michalak S. i inni 2023]:

- magazyn energii elektrycznej rozdzielony na dwie sekcje składające się z 4 i 8 akumulatorów, razem 12 kwasowych baterii akumulatorowych,
- falownik 1 x 230 V, 50 Hz o mocy 6 kVA,
- blok transformatorowo-prostowniczy (BTP),
- kabel wydawczy prądu stałego z końcówką SzRAP-500 (z aktywnym sprzężeniem zwrotnym pomiędzy sekcjami poprzez przyłączenie bloku transformatorowo-prostowniczego (BTP) na wyjściu falownika),
- układ optymalizacji i rozdziału energii
- 8 x 0,43 kW elastycznych paneli fotowoltaicznych.

Schemat blokowy modułu centralnego konstrukcji MPSZE-6 z falownikiem 1 x 230 V, 50 Hz o mocy 6 kVA i zastosowanym BTP pomiędzy dwoma sekcjami akumulatorów przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Moduł centralny systemu MPSZE-6 – schemat blokowy po zastosowaniu BTP pomiędzy dwoma sekcjami akumulatorów: B – bocznik amperomierza, A – amperomierz analogowy, S1 –stycznik załączający napięcie na kabel wydawczy 28 VDC zakończony wtyczką SzRAP-500

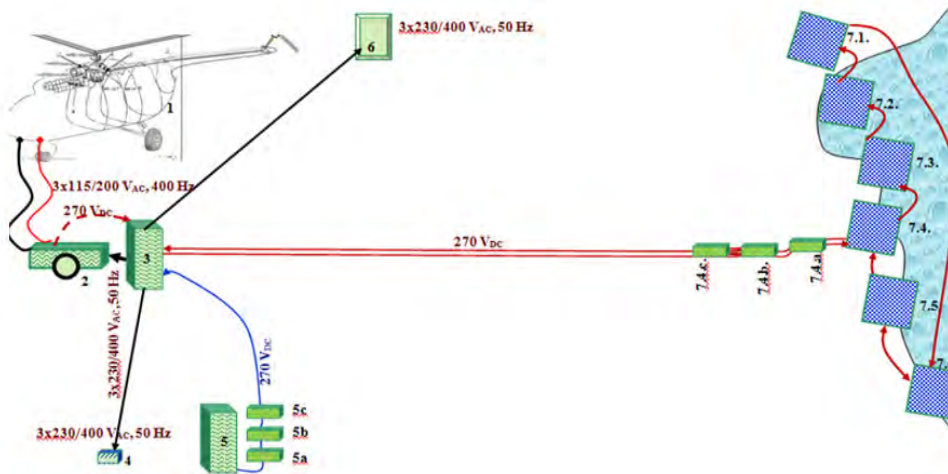
Zestaw 12 baterii akumulatorowych zastosowany w konstrukcji MPSZE-6 na czas rozruchu za pomocą styczników S2 i S3 zostają podzielone na dwie sekcje: „A” i „B”:

1. Sekcja „A” - główną „bierną” (rys. 3,) złożoną z 8 baterii akumulatorowych kwasowych 12 V, Q = 100 Ah, zasilająca kabel wydawczy z wtyczką prądu stałego SzRAP-500;
2. Sekcja „B” - pomocnicza „aktywna” (rys. 3,) złożoną z 4 baterii akumulatorowych kwasowych 12 V_{DC}, Q = 100 Ah, zasilająca („podpierająca”) falownik AZO DIGITAL 6 kW-24.

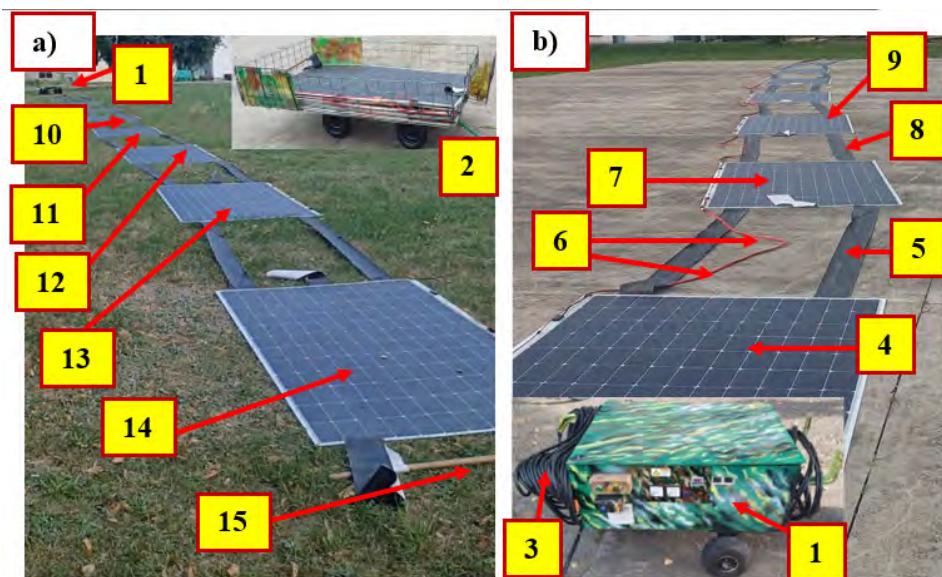
W czasie rozruchu statku powietrznego obie sekcje A i B, przy pomocy przełącznika sterującego zespołem styczników (rys. 3, styczniki: S2, S3), są rozdzielane. Wówczas jednocześnie do wyjścia falownika (AZO DIGITAL 6 kW-24) na wyjście 230 V_{AC} jest przyłączany blok transformatorowo prostowniczy z regulatorem (rys. 3, element BTP), który podaje dodatkową energię elektryczną (28,5 V_{DC}) na kabel wydawczy prądu stałego. W ten sposób charakterystyka wyjściowa prądu stałego zostaje usztywniona.

Schemat przykładowego zastosowania mobilnej polowej stacji zasilania elektrycznego w wariantcie 6 (MPSZE-6) do rozruchu statku powietrznego przedstawiono na rys. 4. System rozmieszczania paneli fotowoltaicznych wykorzystywany

w konstrukcji PSZE-6 po rozwinięciu na lądowisku ITWL na tle pasa trawiastego oraz betonowego przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Schemat przykładowego zastosowania MPZE-6 do rozruchu statku powietrznego: 1 – śmigłowiec zasilany napięciem 28,5 V_{DC}; 2 – układ bezpośredniego zasilania statku powietrznego – wózek akumulatorowy; 3 – centralny układ przetwarzania i rozdziału energii do użytkowników; 4 – jedno-akumulatorowa polowa stacja ładowania akumulatorów; 5 – system metanolowy (ogniwa paliwowe DMFP z urządzeniami pomocniczymi); 5.a – magazyn energii elektrycznej o parametrach: Q = 600 Ah; 5.b – falownik 3x115/200 V, 400 Hz z regulatorem napięcia, 5.c – blok transformatorowo-prostowniczy (stabilizowanym) napięciu wyjściowym $U_{DC} = 270$ V; 6 – węzeł łączności S = 3÷6 kVA; 7.1÷7.6. panel fotowoltaiczna nr 1÷7



Rys. 5. System rozmieszczania paneli fotowoltaicznych wykorzystywany w konstrukcji MPSZE-6 po rozwinięciu na lądowisku ITWL, na tle pasa: a) trawiastego, b) betonowego: 1 – moduł centralny; 2 – wózek do przewożenia paneli fotowoltaicznych; 3 – kabel do połączenia jednostki centralnej z panelami fotowoltaicznymi.; 4, 7, 9, 10÷14 – panele fotowoltaiczne (kolejno nr 1÷8); 5 – pas mechaniczny spinający panele; 6 – kabel elektryczny łączący strukturę elektryczną paneli; 15 – poprzeczka do rozwijania paneli fotowoltaicznych (z wózka 1)

Z uwagi na szybkość rozwijania i miniaturyzacji w czasie przechowywania lub transportu, w miejsce paneli elastycznych przedstawionych na rys. 5, można zastosować panele cienkowarstwowe zwijane w rulon o średnicy 0,7 m każdy [oferta firmy unisolar – dostęp <http://uni-solar.com/products/commercial-products/pvl/index.html>] o łącznej średnicy 30÷40 cm. Problemem jest tu na razie wysoka cena i niska wydajność przetwarzania.

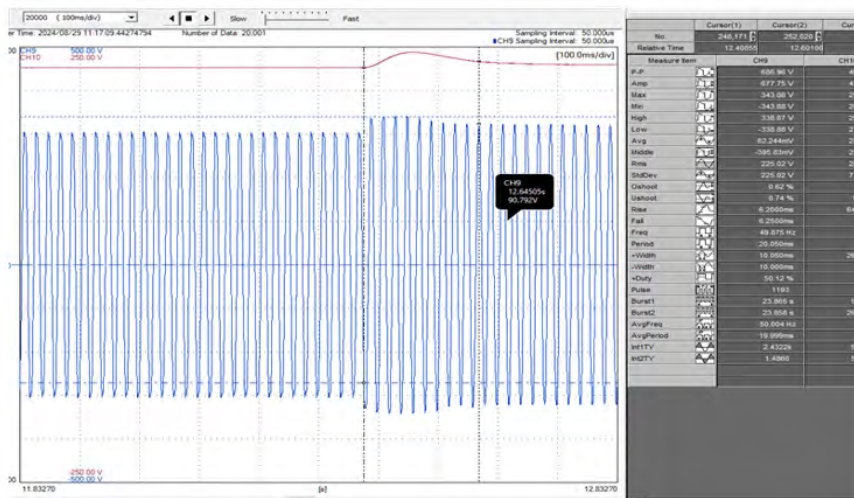
4. BADANIA MPSZE-6

4.1. Badania symulacje modelu pracującego MPSZE-6

Badania symulacje modelu pracującego MPSZE-6 wykazały, że parametry urządzenia spełniały wymagania normatywne [Olesz Różga 2016, PN-ISO 8528-3; PN-ISO 8528-5]. Wartość amplitudy wyniosła 343,06 V_{p-o}, a wartość skuteczna 242,58 V_{AC}. Czas trwania stanu przejściowego wyniósł 192 ms, a czas zredukowany 80 ms [Tokarski *Energies*. 2025; 18(19):5132. <https://doi.org/10.3390/>

en18195132.]. Według norm przedmiotowych [PN-ISO 8528-3] jest to wynik pozytywny i świadczy o wysokiej skuteczności regulatora napięcia w bloku falownika – rys. 3, element Falownik 6 kVA MPSZE-3. Na rys. 6 przedstawiono ekstremalny impuls przepięciowy w stanie przejściowym podczas skokowego zmniejszenia obciążenia obwodu wyjściowego 1 x 230 V_{AC}, 50 Hz [Gębura, Michalak i inni 2023]. Na uwagę zasługuje także bardzo wysoka stabilność częstotliwości – w stanach ustalonych odchyłka do 0,4 Hz. Na uwagę zasługuje także niski współczynnik zawartości harmonicznych przebiegu napięciowego na wyjściu falownika [Adamiec 2018; PN-ISO 8528-5]:

- bez obciążenia – THD = 1,3÷1,5%;
- przy obciążeniu 2,7 kW (U = 226,5 V, I = 12,6 A) – THD = 1,5÷1,6%;
- przy obciążeniu 3,5 kW (U = 218,7 V, I = 15,7 A) – THD = 1,7÷2,5%.



Rys. 6. Badanie wyjścia falownika dla skokowej zmiany poziomu $S = 2\downarrow 4$ kVA: przebieg zmian wartości skutecznej napięcia wyjściowego 1 x 230 V_{AC}, 50 Hz w funkcji czasu

4.2. Badania modelu pracującego MPSZE-3K we współdziałaniu z koreańskim źródłem metanolowym i zestawem koreańskich baterii litowo-jonowych w warunkach laboratoryjnych

Alternatywnym rozwiązaniem jest prezentowany poniżej model MPSZE-3K, w tym ekologicznym źródle energii istnieje możliwość ładowania jego zestawu baterii akumulatorowych ze źródła metanolowego o mocy 1,5 kW typ DM1500 firmy Gaoncell z Korei Południowej – rys. 7, element 2.



Rys. 7. MPSZE-3 z koreańskim źródłem metanolowym (DMFC) oraz falownikiem i laptopem z oprogramowaniem do zapewnienia monitoringu: 1 – MPSZE-3 przystosowana do współpracy z koreańskim źródłem metanolowym; 2 – źródło metanolowe (DMFC) typ DM1500; 3 – falownik; 4 – laptop z oprogramowaniem do zapewnienia monitoringu

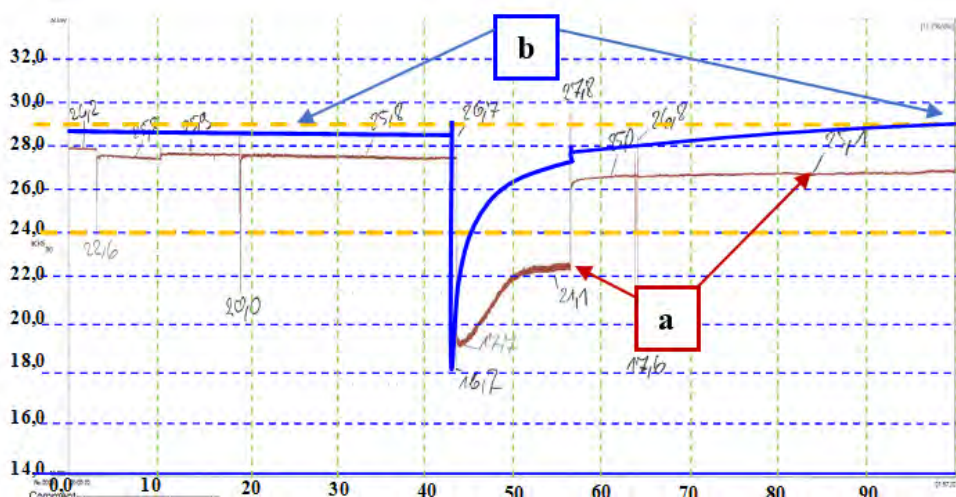
Wcześniej rozważane zastosowanie w MPSZE źródło metanolowe typ. DP-1500 (firmy GaonCell) z powodzeniem stosowane na seryjnie produkowanym, mobilnym wózku widłowym miało jedną zasadniczą wadę – była ciężkie (220 kg) i miało znaczne wymiary $S=600 \times 800 \times 1260$ mm. W ITWL strona koreańska zademonstrowała generator DMFC o niezmiennych wymiarach i masie 130 kg bez możliwości podziału na moduły (rys. 7, element 2), lecz oprócz tego zestaw musiał funkcjonować z dodatkowym falownikiem (rys. 7, element 3), którego masa wynosiła ok. 20 kg. Należało doliczyć masę baterii litowo-jonowych o napięciu 48 VDC współpracujące z ww. falownikiem. Tak więc łączna masa systemu koreańskiego wynosiła 290 kg. Ponadto system ten był raczej stanowiskiem laboratoryjnym umieszczonym na palecie, niż zestawem polowym – nie miała charakteru zwartej, mobilnej zabudowy. Obudowa generatora DMFC (rys. 7, element 2) wykonana była z cienkiego (nieodpornego na wibracje i udary) plastiku. Także próby obciążania elektrycznego (wykonane przy pomocy zestawu wypadły negatywnie parametrycznie. Co gorsza dostarczony przez stronę koreańską zestaw 40 baterii litowo-jonowych ($Q = 12$ Ah i $U = 12$ V_{DC}) był niewydajny i często ulegał samo blokowaniu w stanach przejściowych – następowały samo wyłączenia baterii podczas zadawania stanów przejściowych [Gębura A., Michalak S. i inni 2023].

4.3. Badania konstruktorskie modeli pracujących MPSZE-4÷6 w warunkach lotniskowych – kanał prądu stałego 28,5 V_{DC}

W czasie badań MPSZE-4 wykonanego bez aktywnego sprzężenia zwrotnego (rys. 3, element BTP) w czasie badań stanów przejściowych podczas eksploatacji urządzeń zasilanych, z kanału wyjściowego 28,5V_{DC} stwierdzono wyniki negatywne (rys. 8a):

1. W stanach przejściowych MPSZE-4, przy zmianach poziomu obciążenia (wymuszanych przez odbiorniki energii elektrycznej śmigłowca Mi-2, oraz śmigłowca SW-4 „Puszczyk” występują pojedyncze lub wielokrotne impulsy, zarówno zanikowe jak i przepięciowe, często przekraczające dopuszczalne parametry normatywne [NO-15-A200:2016; NO-17-A202; NO-17-A206:2019],
2. W stanach quasi-ustalonych zanotowano obniżenie poziomu napięcia do 21,0 V.

W związku z powyższym w kolejnych wersjach urządzenia MPSZE należało usztywnić charakterystykę statyczną poprzez zastosowanie aktywnego sprzężenia zwrotnego w postaci bloku transformatorowo-prostowniczego BTP [Adamiec 2018; Gębura, Michałak 2023].



Rys. 8. Pomiary MPSZE na końcu kabla wydawczego 28,5 V_{DC} w czasie rozruchu śmigłowca SW-4 „Puszczyk”: a) przebieg bez sprzężenia zwrotnego – MPSZE-4; b) przebieg ze sprzężeniem zwrotnym – MPSZE-6

Po zastosowaniu bloku BTP zainstalowanym w pętli sprzężenia zwrotnego (pomiędzy wyjściem napięcia przemiennego z falownika a kablem wydawczym rys. 3, element BTP) w czasie badań rozruchów śmigłowca Mi-2 ze źródła MPSZE-6 z zastosowaniem zaobserwowano znaczną poprawę parametrów:

1. Wartość poziomu quasi-ustalonego podczas największego zapotrzebowania prądowego statku powietrznego ulega podwyższeniu do poziomu 21 V (w wariancie MPZE-4 tj. bez sprzężenia zwrotnego ulegał powolnemu obniżaniu),
2. Czas trwania zanikowego osiągnęła poziom 23 ms tj. czas trwania zanikowego impulsu zastępczego 14,59 ms co z nadmiarem 10-krotnym spełnia wymagania normatywne [NO-17-A206:2019; ISO-6858].
3. Wartość impulsów wybiciowych znacznie się zmniejszyła podczas zrzutów obciążenia; jednocześnie ustały oscylacje podczas zrzutów obciążenia, co można tłumaczyć tym, że aktywne sprzężenie zwrotne ma w swej strukturze transformator, który, jak wiadomo z elektrotechniki, przesuwają fazę sygnału o 180° – w ten sposób oscylacje i impulsy wygenerowane przez falownik fotowoltaiczny ulegają wytłumieniu [Adamiec 2018].
4. Po rozruchu wartość napięcia powoli monotonicznie narasta według krzywej wykładniczej w czasie $t \geq 70$ s – rys. 8a, szczególnie 26,8 V,
5. Stabilność częstotliwości obwodu 230 V, 50 Hz w czasie rozruchu śmigłowca Mi-2 jest bardzo wysoka, spełniająca z zapasem wymagania normatywne [PN-ISO 8528-3; PN-ISO 8528-5] – tablica 1 – zakres zmian częstotliwości w stosunku do pomiarów w stanie ustalonym w CSL Dęblin wynosząca 0,12% zwiększyła się tylko do poziomu $0,23 \pm 0,65\%$ - dryft częstotliwości [NO-17-A206:2019] uległ ponad 100-krotnemu zmniejszeniu.

Tabela 1

Badania porównawcze stabilności częstotliwości w obwodzie prądu przemiennego 230 V, 50 Hz (obwód wyjściowy falownika fotowoltaicznego) w czasie rozruchów śmigłowca Mi-2

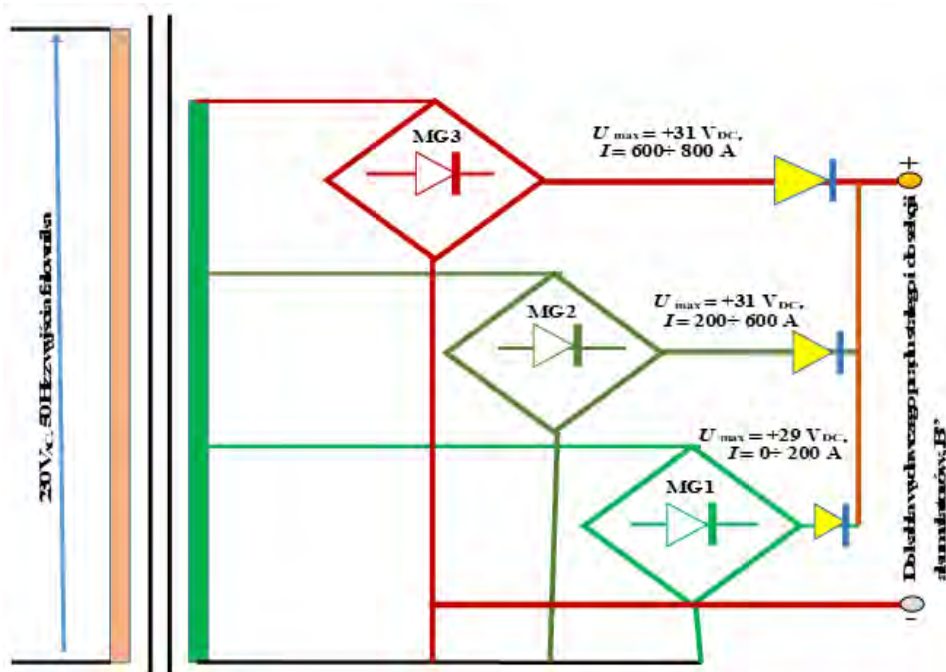
Lp.	Agregat	Jednostka miary	MPZE-4 w CSL Dęblin w stanie ustalonym	MPZE-6 w WAT – rozruch nr 1	MPZE-6 w WAT – rozruch nr 2	MPZE-6 w WAT – rozruch nr 3
1	2	3	4	5	6	7
1	f_{sr}	Hz	50,0127	50,0039	49,9837	50,0039
2	F_{max}	Hz	50,076	50,1829	50,097	50,1829
3		%	100,127%	100,358%	100,227%	100,358%
4	F_{min}	Hz	49,9647	49,6803	48,8712	49,6803
5		%	99,904%	99,353%	97,774%	99,353%
6	f_{pp}	Hz	0,1112	0,5026	0,2258	0,5026
7	f_p	Hz	16,6884	0,00827	0,0083	0,0083
8		%	33,368%	0,017%	0,017%	0,017%
9	ΔF	Hz	0,0632	0,3236	0,1133	0,3236
10		%	0,126%	0,647%	0,227%	0,647%
11	dryft	Hz/min	0,0073	0,000021	0,0227	0,000021

Zastosowane aktywne sprzężenie zwrotne (pomiędzy wyjściem falownika a kablem wydawczym SzRAP-500) spowodowało:

- 1) skrócenie czasu obniżenia napięcia poniżej $24 V_{DC}$;
- 2) zmniejszyło oscylacje w stanach przejściowych;
- 3) zmniejszyło poziom dryftu częstotliwości,

ale po ustaniu zapotrzebowania prądowego statku powietrznego intensywnie ładuje sekcję B (8 akumulatorów ołowiowych), co grozi ich przeładowaniem i skrajnym wyładowaniem baterii (4 akumulatorów wspierających falownik fotowoltaiczny).

Z uwagi na powyższe wskazane jest więc automatyczne wyłączenie ww. sprzężenia zwrotnego przy zmniejszeniu zapotrzebowania prądowego poniżej $290 A$. Z tego względu należy skonstruować własny blok transformatorowo-prostowniczy, gdzie poziom wzmacnienia prądowego pomiędzy sekcją „A”, a „B” byłby zależny od poziomu natężenia prądu w kablu wydawczym (rys. 9).



Rys. 9. Schemat ideowy (uproszczony) bloku transformatorowo-prostowniczego przeznaczonego dla MPSZE-7 – MG1÷3 mostki Gretza włączane kolejno w zależności od poziomu natężenia prądu na kablu wydawczym prądu stałego

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. MPSZE-6 jest uniwersalną konstrukcją, która może zasilac statki powietrzne, systemy łączności, system oświetlenia lądowiska „Moskit”.
2. Konstrukcja MPSZE-6 ma duże możliwości wszelkiego rodzaju maskowania oraz mobilności i miniaturyzacji.
3. W konstrukcjach MPSZE należy zrezygnować z ciężkich baterii ołowiowych na korzyść lekkich i bardziej wydajnych baterii litowo-żelazowo-fosforkowych.
4. Konstrukcje MPSZE realizowane w ITWL powinny bazować na wypróbowanych i ogólnodostępnych modułach technologiach fotowoltaicznych oraz technika zasilania statków powietrznych z LZE.
5. W konstrukcjach MPSZE z uwagi na szybkość rozwijania i miniaturyzacji w czasie przechowywania lub transportu, w miejsce paneli elastycznych, można zastosować panele cienkowarstwowe zwijane w rulon.
6. MPSZE można również zastosować do celów pozamilitarnych takich jak: zestawy ratownicze, szpitale polowe, do zasilania różnego rodzaju maszyn i urządzeń oraz zasilania infrastruktury obozów dyslokacji ludności w trudno dostępnych miejscach w czasie klęsk żywiołowych np. trzęsień ziemi.
7. Ponadto MPSZE można wykorzystać do wsparcia oddziałów działających w odosobnieniu na terytorium przeciwnika, gdzie wchodzi w rachubę (oprócz transportu pojazdem kołowym, szynowym lub powietrznym w przedziale transportowym) zrzut powietrzny z podwieszenia pod śmigłowcem lub na spadochronie.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Adamiec M.: Podstawy elektrotechniki i elektroniki dla studentów Wydziału Mechanicznego. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2018.
2. Bujło P.: *Polimerowe, superjonowe membrany dla ogniw paliwowych typu PEMFC (rozprawa doktorska)*. Wrocław: Politechnika Wrocławska, 2007.
3. Ciechanowicz W.: Szczukowski S.: Ognia paliwowe, wodór, metanol i biomasa szansą rozwoju obszarów wiejskich i zurbanizowanych. Olsztyn: Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego.2015.
4. Czerwiński A.: *Akumulatory, baterie, ogniwa*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ,2016, ISBN: 9788320615647, EAN: 9788320615647; Liczba stron: 188.
5. Gawinowski M.: *Analiza możliwości zastąpienia istniejącego silnika GTD-350 w lotniskowym urządzeniu zasilania elektrycznego samolotów wodorowym ogniwem paliwowym (praca inżynierska)*. Lotnicza Akademia Wojskowa, Dęblin 2022.
6. Izydorzyc J., Konopacki J.: *Filtry analogowe I cyfrowe*. PAN – oddział w Katowicach, Gliwice 2003.
7. Jankowski A.: *Wybrane zagadnienia funkcjonalne i aplikacyjne ogniw paliwowych*. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 2012.
8. Lewandowski Witold M.: *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2006. ISBN 83-204-3112-3.

9. Lubiejewski S.: Planowanie oraz organizowanie wysuniętego punktu uzbrajania i tankowania śmigłowców (FARP) działaniach bojowych Sił Zbrojnych RP. Wydawnictwo 16 Płano-wiiBellona 3/2018. Warszawa 2018, pp. 116-136.
10. Małek A. Wendeker M.: *Ogniwa paliwowe typu PEM, teoria i praktyka. Ogniwa paliwowe typu PEM, teoria i praktyka*. Lublin: Politechnika Lubelska, 2010.
11. Mroziński A., J.B. Flizikowski, Inżynieria instalacji fotowoltaicznych, Monografia pod redakcją A. Mrozińskiego, *Wydawnictwo Grafpol Agnieszka Blicharz-Krupińska* [Online]https://www.researchgate.net/publication/308904557_inzynieria_instalacji_fotowoltaicznych.
12. Ogulewicz W.: *Pozyskiwanie energii z ogniwo paliwowych typu PEM chłodzonych cieczą*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010.
13. Tytko R., Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej, *Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce*, Kraków 2015

Artykuły w czasopismach

1. Chrząścik W.: *Wybrane aspekty ochrony ludności cywilnej podczas konfliktów zbrojnych w świetle Konwencji genewskich i Protokołów dodatkowych*. Zeszyt Prawniczy UAM 2021 • nr 11
2. Gębura A., Szelmanowski A., Brzozowski M.: Możliwości zastosowania systemów fotowoltaicznych w technologiach wojskowych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 10/2024, ISSN 0033-2097, 10/2020, pkt. MNiSW 70.
3. Górski K., Łukomski M.: *Odnawialne Źródła Energii w zasilaniu wojskowych urządzeń elektronicznych małej mocy*. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, r. 98 Nr 9/2022. doi:10.15199/48.2022.09.22.
4. Khawla Chaoui, *a Kamel Zanat, a Warda Elaggoune, b Luc Henrardc and Mohamed Achehboune: *Theoretical insights into Z-scheme BAs/GeC van der Waals heterostructure for high-efficiency solar cell*. *RSC Advances*, RSC Adv., 2024, 14, 39625, DOI: 10.1039/d4ra08369e.
5. Kobyłecki, R. i BIS, Z. 2008. *Węglowe ogniwo paliwowe – wysokosprawne źródło czystej energii elektrycznej*. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 11, z. 1, s. 219–226, 2008.
6. Li Qi i inni: *Progress in electrolytes for rechargeable Li-based batteries and beyond*, „Green Energy & Environment”, 1 (1), 2016, s. 18–2, DOI: 10.1016/j.gee.2016.04.006.
7. Maleczek S., Szczepaniak M., Malicki W.: *Zastosowanie polikrystalicznych ogniwo krzemowych jako elastycznych pokryw fotowoltaicznych*. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 2/2018 (118).
8. Marszałek K., T. Stapiński, Rozwój cienkościennych ogniwo fotowoltaicznych, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, zeszyt 266, 2014 [Online] Dostęp: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-ef498de5-1d3a-4a51-9513-e1445469058d>.
9. Michalak S., Kowalczyk H., Gębura A., Tokarski T.: *Przegląd ekologicznych militarnych i cywilnych systemów zasilania*. *Journal of KONBiN* 2024; 54 (1): 33-46.
10. Olesz Marek, Różga Jacek: *Wymagania prawne dotyczące jakości energii w instalacjach elektroenergetycznych*. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. XLI Konferencja Naukowo-Techniczna „Gdańskie Dni Elektryki”*. Nr 50. Gdańsk 2016.
11. Szczepaniak M., Stanisław Maleczek (Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjne): *Militarne systemy fotowoltaiczne. Napędy i Sterowanie*. 2017.

12. Szczepaniak M.: Hybrydowe źródło zasilania elektrycznego urządzeń wspomagających akcje ratownicze i ewakuację. „Elektronika” 7/2013.
13. Tokarski T., Michalak S., Kaczmarek B., Zieja M., Polus T.: Power Quality in the Context of Aircraft Operational Safety, MDPI *Energies* 2025, 18(8), 1945; <https://doi.org/10.3390/en18081945> - 10 Apr 2025
14. Tokarski T., Michalak S., Gajewski T. Counteracting the Aging Process of the Aircraft's DC Power Grid in the Context of Shaping the Characteristics of the Power Source. *Energies*. 2025; 18(19):5132. <https://doi.org/10.3390/en18195132>

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Daroszewski P., Huber J.: Bezpieczeństwo struktury krytycznej w ortopedyczno-rehabilitacyjnym szpitalu klinicznym im. Prof. W. Delgi Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu im. Karola Marcinkowskiego. [w:] Żyluk A, Siemkło Ł., Ciałkowski M.: „Nauko dla obronności – Perspektywy logistyki wojskowej i cywilnej w kontekście zapewnienia odporności energetycznej siłom zbrojnym”, t. 1. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Warszawa 2024, ISBN 978-83-61021-75 9.
2. Lubiejewski S.: Planowanie oraz organizowanie wysuniętego punktu uzbrajania i tankowania śmigłowców (FARP) działaniach bojowych Sił Zbrojnych RP. Wydawnictwo 16 Pl ano-wiiBellona 3/2018. Warszawa 2018, pp. 116-136.
3. Łukowski D., Kępczyński A.: Transformacja energetyczna – wyzwania dla sił zbrojnych. [w:] Żyluk A, Siemkło Ł., Ciałkowski M.: „Nauko dla obronności – Perspektywy logistyki wojskowej i cywilnej w kontekście zapewnienia odporności energetycznej siłom zbrojnym”, t. 1. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Warszawa 2024, ISBN 978-83-61021-75 9.
4. Mikutel T.: System elektroenergetyczny państwa jako obiekt ataku z powietrza. [w:] Żyluk A, Siemkło Ł., Ciałkowski M.: „Nauko dla obronności – Perspektywy logistyki wojskowej i cywilnej w kontekście zapewnienia odporności energetycznej siłom zbrojnym”, t. 3. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Warszawa 2024, ISBN 978-83-61021-75 9.
5. Wojciechowski A.: Akumulatory litowo-fosfatowe – możliwości wykorzystania w technice wojskowej. Inżynieria Wojskowa – Problemy i perspektywy, Konferencja Naukowo-Techniczna WITI 2013, Wrocław 2013

Normy

1. Norma Obronna NO-15-A200:2016 *Wojskowe statki powietrzne. Pokładowe układy zasilania elektrycznego. Podstawowe parametry, wymagania i badania.*
2. Norma Obronna NO-17-A202: *Wojskowe statki powietrzne. Elektryczne układy rozruchu i zapłonu silników turbinowych. Podstawowe wymagania i badania.*
3. Norma Obronna NO-17-A206:2019: *Wojskowe statki powietrzne - Naziemne układy zasilania elektroenergetycznego. Podstawowe parametry, wymagania i badania.* Zatwierdzona decyzją nr 117/MON Ministra Obrony Narodowej z dnia 29 lipca 2019 r. (Dz. Urz. Min. Obr. Nar. Poz. 145).
4. Polska Norma PN-ISO 8528-3 *Zespoły prądotwórcze prądu przemiennego napędzane silnikiem spalinowym tłokowym. Prądnice prądu przemiennego do zespołów prądotwórczych.*

5. Polska Norma PN-ISO 8528-5 *Zespoły prądowórcze prądu przemiennego napędzane silnikiem spalinowym tłokowym. Zespoły prądowórcze.*
6. International Standard ISO-6858: *Aircraft – ground support electrical supplies – general requirements.*

Rozporządzenia

1. Departament Innowacji - Ministerstwo Obrony Narodowej - Załącznik do dokumentu: *Priorytetowe kierunki badań naukowych w resorcie obrony narodowej w latach 2021–2035.* Warszawa 2023.
2. Obwieszczenie Ministra Obrony Narodowej z dnia 4 lutego 2020 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Obrony Narodowej w sprawie przestrzegania przepisów o ochronie środowiska w komórkach i jednostkach organizacyjnych podległych Ministrowi Obrony Narodowej albo przez niego nadzorowanych

Opracowania i raporty z badań

Gębura A., Michalak S. i inni: *Mobilna stacja zasilania elektrycznego statków powietrznych z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii.* (opracowanie monograficzne „zastrzeżone”), Warszawa 2023, 150 stron, KEW: Z-657.

Komunikaty Internetowe

1. <https://zbiam.pl/artykuly/drogowe-odcinki-lotniskowe/> – dostępne 18.03.2026.
2. Gogle: przebazowanie i rozśrodkowywanie śmigłowców - dostępne 18.03.2026.
3. <https://biznesalert.pl/slonce-nad-polem-bitwy-rosja-i-ukraina-zasilaja-drony-energia-sloneczna/> – dostępne 18.03.2026
4. https://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2008/may/ts_sf04.pdf – 10.01.2022 r.
5. oferta firmy uni-solar [online] dostęp: <http://uni-solar.com/products/commercial-products/pvl/index.html> – dostępne 18.03.2026

ACKNOWLEDGEMENTS

Sfinansowano ze środków własnych Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych

MPZE-6 MOBILE FIELD POWER SUPPLY STATION BASED ON ECOLOGICAL ENERGY SOURCES

Abstract

This article presents a model of a mobile field power supply station (MPSZE) developed at the Air Force Institute of Technology (AFIT), which utilizes renewable sources to generate and store electricity. The core element of the presented solution is a set of electric batteries. As an eco-friendly energy source, the MPSZE can be charged from flexible, non-reflective photovoltaic panels, hydrogen or methanol sources, or alternatively from generators or industrial grids. The station presented in this study, called MPSZE-6, is equipped with an energy optimization system and an inverter, and can power aircraft with a voltage of 28.5 VDC and perform start-ups with a current surge of up to 1200 A. Furthermore, the presented model can power radio systems or staff facilities during deployment with a voltage of 1x 230 VAC, 50 Hz, with a long-term power of 3 kVA and a short-term power of 6 kVA. The system's advantages include limited infrared emission and noise, while its dimensions and ergonomics make it easy to conceal. In today's world of war, where reconnaissance drones and satellites can detect any vehicle, such a power supply device can be a valuable addition to the ground power infrastructure for both air and ground forces, especially during deployments.

Keywords: photovoltaic panels, rebasing, ground power supply, direct current, alternating current, inverter, hydrogen sources, methanol sources

Rafał GRZEGORCZYK*

Jan DZIEDZIC**

Marianna JANKOWSKA**

Bartosz CIUPEK**

Andrzej FRĄCKOWIAK**

Michał CIAŁKOWSKI**

POTENCJAŁ ENERGETYCZNY BIOMASY DRZEWNEJ W KREOWANIU WYSP ENERGETYCZNYCH DLA OBSZARÓW STRATEGICZNYCH

W artykule przedstawiono analizę techniczną wybranych frakcji biomasy drzewnej pochodzących z obszaru Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Szczecinku, przeprowadzoną w celu oceny ich parametrów energetycznych oraz przydatności do zastosowań w lokalnych systemach wytwarzania energii. Celem dodatkowym było określenie potencjału biomasy drzewnej w kontekście tworzenia wysp energetycznych dla jednostek Lasów Państwowych w oparciu o ten surowiec energetyczny. W pracy omówiono kluczowe aspekty technologiczne konwersji biomasy na energię, ze szczególnym uwzględnieniem siłowni kogeneracyjnych oraz koncepcji trigeneracyjnych, a także dokonano wstępnej oceny opłacalności takich rozwiązań. Klasyfikacja obszarów leśnych, jako infrastruktury krytycznej, silnie związanej z odpornością systemu energetycznego na sytuacje kryzysowe powoduje konieczność przeglądu aktualnych systemów energetycznych stosowanych w obszarach strategicznych. Przyczynę do kreowania wysp energetycznych, a później łączenia ich w archipelagi energetyczne, w zakresie poszczególnych jednostek Regionalnych Dyrekcji Lasów Państwowych jest w aktualnej sytuacji geopolitycznej i koncepcji rozwiązywania sytuacji kryzysowych, jednym z rozsądnych działań, jakie można realizować. Ponadto podkreślono znaczenie samowystarczalności energetycznej oraz odporności infrastruktury leśnej w sytuacjach kryzysowych.

Słowa kluczowe: biomasa, energia odnawialna, wartość opałowa, parametry techniczne biomasy, zasoby biomasy leśnej

* Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych w Szczecinku, Lasy Państwowe.

** Instytut Energetyki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienia bezpieczeństwa i niezależności energetycznej stanowią dzisiaj integralny komponent narodowego i operacyjnego bezpieczeństwa państwa. Coraz większą uwagę przykładą się do rozwiązań energetycznych zapewniających niezależność i odporność infrastruktury krytycznej, zwłaszcza na zakłócenia: wewnętrzne i zewnętrzne. W tym kontekście infrastruktura leśna, a zwłaszcza Państwowe Gospodarstwo Leśne – Lasy Państwowe, ze względu na swoje strategiczne znaczenie, ciągle zapotrzebowanie na energię oraz konieczność zapewnienia ciągłości działania w warunkach kryzysowych stanowi obiekt o szczególnym znaczeniu dla stabilności państwa. Ze względu na rozproszoną lokalizację jednostek organizacyjnych wchodzących w skład poszczególnych Regionalnych Dyrekcji Lasów Państwowych (składających się z nadleśnictw i leśnictw) najbardziej rozsądnym kryterium decyzyjnym w zakresie stabilnego działania i zarządzania lasami w ich obszarach decyzyjnych jest kreowanie ich, jako niezależne wyspy energetyczne. Kolejnym krokiem po tworzeniu lokalnych wysp energetycznych jest kreowanie archipelagów wysp energetycznych, ściśle ze sobą powiązanych przez system zarządzania kryzysowego, komunikacji i logistyki. Dotychczasowe rozwiązania energetyczne stosowane w ramach budynków nadleśnictw opierają się głównie na paliwach kopalnych oraz dostępie do sieci elektroenergetycznej, co w aktualnej sytuacji geopolitycznej powoduje silną podatność na zakłócenia, zarówno w wyniku działań militarnych, jak i katastrof naturalnych czy innych sytuacji kryzysowych [1].

W tym kontekście biomasa drzewna, jako naturalne źródło energii w lasach, jawi się, jako potencjalnie kluczowy komponent hybrydowych systemów wysp energetycznych, oferując źródło energii możliwe do lokalnego pozyskania, przetworzenia i wykorzystania, zarówno w trybie awaryjnym, jak i jako element systemu komplementarnego wobec konwencjonalnych źródeł, a docelowo, jako główne i jedyne źródło energii [2]. Biomasa, traktowana dotąd głównie w kontekście sektora cywilnego (rolnictwo, gospodarstwa domowe, przemysł spożywczy), nie była dotąd szerzej analizowana, jako stabilne i trwałe źródło energii do celu kreowania wysp energetycznych w ramach gospodarki leśnej. Tymczasem infrastruktura oparta na sieciach przesyłowych, choć rozbudowana i zaawansowana technologicznie, pozostaje w dużej mierze zależna od zewnętrznych dostaw energii, co w sytuacjach zagrożenia (wojna, klęska żywiołowa, awarie systemowe) może znacząco ograniczyć jej zdolności operacyjne.

Celem niniejszej pracy jest techniczna analiza wybranych rodzajów biomasy leśnej pod kątem ich przydatności energetycznej w warunkach funkcjonowania Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych (RDLP) w Szczecinku, jako przyczynek do dalszego rozważania zasadności kreowania w jej obszarze niezależnych wysp energetycznych. W ramach pracy przeprowadzono również analizę zasobów drzewnych na pniu oraz poziomu pozyskania drewna w RDLP w Szczecinku, ze szczególnym uwzględnieniem udziału drewna przeznaczonego na cele energetyczne. Przeprowadzone badania mają na celu ocenę właściwości fizykochemicznych wybranych paliw biomasowych, ich

technologicznej przydatności na procesy konwersji energii (spalanie, zagazowanie, piroliza, pelletyzacja itd.) oraz wskazanie optymalnych kierunków rozwojowych. Szczególny nacisk położono na analizę parametru węgla związanego (ang. *fixed carbon*), jako jednego z kluczowych wskaźników wartości opałowej i efektywności energetycznej paliwa. Parametr ten ma szczególne znaczenie w zastosowaniach energetycznych, gdzie liczy się maksymalna wydajność przy minimalnym jej udziale [3, 4].

Zakres pracy obejmuje analizę ośmiu rodzajów biomasy drzewnej, do której należą próbki z następujących gatunków drzew: sosna zwyczajna (*Pinus silvestris* L.): odrębnie drewno bielaste i twarde, modrzew europejski (*Larix decidua* Mill.), świerk pospolity (*Picea abies* (L.) H.Karst), brzoza brodawkowata (*Betula pendula* Roth), buk zwyczajny (*Fagus sylvatica* L.), dąb bezszypułkowy (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), olsza czarna (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), a także analizę zasobów drzewnych na pniu oraz poziomu pozyskania drewna w RDLP w Szczecinku. Materiały te zostały dobrane na podstawie ich dostępności oraz potencjału produkcyjnego możliwego do uruchomienia na potrzeby samowystarczalności energetycznej RDLP w Szczecinku. Badania laboratoryjne przeprowadzono zgodnie z obowiązującymi normami międzynarodowymi i krajowymi, obejmując m.in. oznaczenie wilgotności, zawartości popiołu, substancji lotnych, węgla związanego (ang. *fixed carbon*) oraz ciepła spalania i wartości opałowej [5].

Nowatorski charakter niniejszego opracowania wynika z faktu, iż w przeciwieństwie do dotychczasowych badań nad biomasą skupiających się niemal wyłącznie na kontekście cywilnym niniejsza praca uwzględnia specyfikę RDLP w Szczecinku, jej ograniczenia przestrzenne, wymogi ciągłości pracy oraz potrzebę minimalizacji ryzyka eksploatacyjnego. Uwzględniono również realne ograniczenia logistyczne i operacyjne charakterystyczne dla obszarów leśnych, zarówno w czasie pokoju, jak i w warunkach kryzysowych, kiedy to dostęp do zewnętrznych źródeł energii może być niemożliwy lub znacznie ograniczony. Praca stanowi wkład w rozwój koncepcji wysp energetycznych, opartych na lokalnych i odnawialnych źródłach energii, zgodnie z aktualnymi trendami odporności infrastruktury krytycznej.

2. POTENCJAŁ SUROWCOWY ORAZ ANALIZA TECHNICZNA BIOMASY DRZEWNEJ Z RDLP W SZCZECINKU

Współczesne wyzwania związane z bezpieczeństwem energetycznym jednostek organizacyjnych Lasów Państwowych, w tym leśnictw funkcjonujących w strukturach regionalnych dyrekcji Lasów Państwowych, wymagają poszukiwania rozwiązań zwiększających ich autonomię energetyczną oraz odporność na zakłócenia w dostawach energii elektrycznej i cieplnej. W sytuacjach kryzysowych, takich jak ekstremalne zjawiska pogodowe, awarie sieci elektroenergetycznych, pożary lasów czy zaburzenia w funkcjonowaniu infrastruktury technicznej, dostęp do energii staje się

czynnikiem kluczowym dla utrzymania ciągłości pracy, ochrony mienia Skarbu Państwa oraz realizacji zadań związanych z gospodarką leśną i ochroną przyrody. W tym kontekście koncepcja lokalnych wysp energetycznych, opartych na odnawialnych źródłach energii, nabiera szczególnego znaczenia.

Biomasa drzewna, jako surowiec odnawialny i powszechnie dostępny w środowisku leśnym, posiada istotny potencjał do wykorzystania w lokalnych systemach energetycznych budynków nadleśnictw. Jej zastosowanie w instalacjach grzewczych, kogeneracyjnych lub w układach przetwarzania energii cieplnej na elektryczną może stanowić podstawę funkcjonowania wysp energetycznych, niezależnych od zewnętrznych sieci przesyłowych. Szczególnie istotne jest to, że znaczna część biomasy może pochodzić z bieżącej działalności gospodarki leśnej, w tym z pozostałości pozrębowych, drewna niskiej jakości technicznej, sortymentów energetycznych czy odpadów powstających podczas zabiegów pielęgnacyjnych i ochronnych. Takie podejście sprzyja racjonalnemu zagospodarowaniu surowca, ograniczeniu kosztów transportu oraz zwiększeniu samowystarczalności energetycznej jednostek terenowych.

Wdrożenie biomasy drzewnej, jako podstawowego nośnika energii w systemach wysp energetycznych nadleśnictw wymaga jednak przeprowadzenia szczegółowych analiz technicznych i surowcowych. Kluczowe znaczenie ma ocena właściwości fizykochemicznych dostępnych frakcji biomasy, ich przydatności do bezpośredniego spalania, zgazowania lub przetwarzania w biopaliwa stałe, takie jak zrębki czy pelety. Istotnymi parametrami determinującymi efektywność energetyczną są m.in. zawartość wilgoci, popiołu, substancji lotnych oraz udział węgla związanego, które wpływają na wartość opałową paliwa, stabilność procesu spalania oraz niezawodność pracy instalacji w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Dopiero na podstawie kompleksowej analizy technicznej i logistycznej możliwe jest zaprojektowanie i wdrożenie efektywnego systemu wyspy energetycznej, dostosowanego do specyfiki danego nadleśnictwa i jego zasobów biomasy drzewnej.

2.1. Potencjał zasobów drzewnych i pozyskanie drewna w RDLP w Szczecinku

Zasoby drzewne stanowią podstawowy element potencjału surowcowego umożliwiającego wykorzystanie biomasy drzewnej w lokalnych systemach energetycznych. W przypadku Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Szczecinku wielkość zasobów drzewnych, ich struktura gatunkowa oraz poziom bieżącego pozyskania drewna determinują realne możliwości wykorzystania biomasy w lokalnych systemach energetycznych.

W tabeli 1 zestawiono stan zasobów drzewnych na pniu w RDLP w Szczecinku według stanu na 1 stycznia 2025 r. i 1 stycznia 2026 r. wraz ze zmianą zasobów w podziale na gatunki drzew:

Tabela 1

Stan zasobów drzewnych na pniu w RDLP w Szczecinku według gatunków (stan na 1.01.2025 r. i 1.01.2026 r.)

L.p.	Gatunek	Stan zasobów na 1.01.2025r. [tys. m ³]	Stan zasobów na 1.01.2026r. [tys. m ³]	Zmiana zasobów [tys. m ³]
1.	Sosna (<i>Pinus spp.</i>)	99 349	99 759	+410
2.	Modrzew europejski (<i>Larix decidua</i> Mill.)	2 613	2 661	+48
3.	Świerk pospolity (<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst)	7 785	7 197	-588
4.	Brzoza brodawkowata (<i>Betula pendula</i> Roth)	11 348	11 348	0
5.	Buk zwyczajny (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	12 709	13 121	+412
6.	Dąb (<i>Quercus spp.</i>)	6 436	6 517	+81
7.	Olsza (<i>Alnus spp.</i>)	6 393	6 594	+201
8.	Pozostałe	1 511	1 608	+97
9.	Ogółem zasoby	148 145	148 806	+661

Źródło: na podstawie danych RDLP w Szczecinku.

Według danych na dzień 1 stycznia 2025 r. oraz 1 stycznia 2026 r. całkowite zasoby drzewne w RDLP w Szczecinku wzrosły z poziomu 148 145 tys. m³ do 148 806 tys. m³, co oznacza przyrost zasobów o 661 tys. m³ w analizowanym okresie. Największy udział w strukturze zasobów stanowi sosna, której zasoby przekraczają 99 mln m³ i odpowiadają za dominującą część całkowitej miąższości drzewostanów. Istotny udział w strukturze zasobów posiadają również gatunki liściaste, przede wszystkim buk zwyczajny, brzoza brodawkowata oraz dęby.

Analiza zmian zasobów wskazuje na ich ogólny wzrost w większości gatunków drzew. Największy przyrost odnotowano w przypadku buka zwyczajnego (+412 tys. m³), sosny (+410 tys. m³) oraz olszy (+201 tys. m³). Spadek zasobów stwierdzono jedynie w przypadku świerka pospolitego, co jest związane z oddziaływaniem niekorzystnych czynników biotycznych i abiotycznych, w tym gradacji owadów wtórnych (kornik drukarz) oraz obniżeniem odporności drzewostanów na stres środowiskowy (deficyt wody).

Z punktu widzenia możliwości wykorzystania biomasy drzewnej na cele energetyczne istotne znaczenie ma poziom bieżącego pozyskania drewna w relacji do całkowitych zasobów drzewnych.

W tabeli 2 przedstawiono pozyskanie drewna w jednostkach RDLP w Szczecinku w roku 2025:

Tabela 2

Pozyskanie drewna w RDLP w Szczecinku w roku 2025

L.p.	Gatunek	Stan zasobów na 1.01.2025r. [tys. m ³]	Pozyskanie w roku 2025 [tys. m ³]	Pozyskanie w roku 2025 względem za- sobów
1.	Sosna (<i>Pinus spp.</i>)	99 349	2 017	2,0%
2.	Modrzew europejski (<i>Larix decidua</i> Mill.)	2 613	36	1,4%
3.	Świerk pospolity (<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst)	7 785	516	6,6%
4.	Brzoza brodawkowa (<i>Betula pen- dula</i> Roth)	11 348	154	1,4%
5.	Buk zwyczajny (<i>Fa- gus sylvatica</i> L.)	12 709	162	1,3%
6.	Dąb (<i>Quercus spp.</i>)	6 436	59	0,9%
7.	Olsza (<i>Alnus spp.</i>)	6 393	14	0,2%
8.	Pozostałe	1 511	27	1,8%
9.	Ogółem zasoby	148 145	2 985	2,0%

Źródło: na podstawie danych RDLP w Szczecinku.

W roku 2025 w RDLP w Szczecinku pozyskano łącznie 2 985 tys. m³ drewna, co odpowiada około 2,0% ogólnego stanu zasobów drzewnych. W strukturze tej istotny udział miało drewno o obniżonej jakości technicznej i przeznaczone na cele energetyczne, którego wolumen wyniósł 605 tys. m³, co stanowi około 20,3% całkowitego pozyskania drewna. Dane te wskazują, że już obecnie znaczna część surowca drzewnego pozyskiwanego na obszarze RDLP może stanowić bezpośrednią lub pośrednią bazę paliwową dla lokalnych systemów energetycznych.

Największe pozyskanie odnotowano w przypadku sosny (2 017 tys. m³), która pozostaje podstawowym gatunkiem gospodarczym w regionie. Relatywnie wysoki udział pozyskania w stosunku do zasobów dotyczy także świerka (6,6%), co wynika głównie z konieczności prowadzenia cięć sanitarnych związanych z pogarszającym się stanem zdrowotnym drzewostanów. W przypadku pozostałych gatunków poziom pozyskania w relacji do zasobów pozostaje na poziomie od 0,2% do 1,8%, co wskazuje na zrównoważone użytkowanie zasobami.

Przedstawione dane potwierdzają, że potencjał surowcowy RDLP w Szczecinku charakteryzuje się dużą stabilnością oraz znaczną skalą zasobów drzewnych. Szczególnego znaczenia nabiera fakt, że istotna część pozyskania obejmuje drewno energetyczne, które może być wykorzystane w sposób planowy w lokalnych instalacjach

energetycznych. Oznacza to, że w strukturach RDLP istnieje realny i mierzalny potencjał surowcowy umożliwiający rozwój systemów energetycznych opartych na biomacie drzewnej, wspierających funkcjonowanie lokalnych wysp energetycznych.

2.2. Dostępność biomasy drzewnej

Na podstawie analizy drzewostanu w RDLP w Szczecinku wytypowano następujące rodzaje biomasy drzewnej do analizy technicznej ich przydatności pod kątem tworzenia wysp energetycznych w obrębie zarządzania jednostki i przedstawiono w Tabeli 3.

W kontekście nadleśnictw szczególnie istotna jest możliwość wykorzystania biomasy lokalnie dostępnej, w tym pozyskiwanej z własnych źródeł i zasobów leśnych. Ważnym aspektem jest wymiana informacji pomiędzy poszczególnymi wyspami energetycznymi w zarządzanym w ramach RDLP archipelagu wysp energetycznych. Stabilny przepływ informacji z zakresu aktualnie dostępnych źródeł energii, sił wytwórczych, zainstalowanej mocy cieplnej i elektrycznej oraz stopień zasilania w inną energię poszczególnej wyspy energetycznej pozwala stabilnie zarządzać całym systemem energetycznym w archipelagu, kontrolować przepływ informacji oraz organizować procedury logistyczne na kierunkach najpilniej wymagających działania.

Tabela 3

Biomasa drzewna wybrana do analiz

Nr	Gatunek	Adres leśny	Typ siedliskowy lasu	Wiek drzewa [lata]
1	Sosna zwyczajna (<i>Pinus silvestris</i> L.) Drewno bielaste	11-30-1-11-54-k-00	Las mieszany świeży	71
2	Sosna zwyczajna (<i>Pinus silvestris</i> L.) Drewno twarde- lowe	11-30-1-11-54-k-00	Las mieszany świeży	71
3	Modrzew europejski (<i>Larix decidua</i> Mill.)	11-30-1-11-44-a-00	Las świeży	58
4	Świerk pospolity (<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst)	11-30-1-11-54-d-00	Bór mieszany świeży	59
5	Brzoza brodawkowa (<i>Betula pendula</i> Roth)	11-30-1-11-32-d-00	Las świeży	81
6	Buk zwyczajny (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	11-30-1-11-32-d-00	Las świeży	81

7	Dąb bezszypułkowy (<i>Quercus petraea</i> (Matt.) Liebl.)	11-30-1-11-32-d-00	Las świeży	101
8	Olsza czarna (<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.)	11-30-1-11-32-d-00	Las świeży	81

2.3. Metody badawcze

Analizę techniczną przeprowadzono w Laboratorium Procesów Konwersji Energii (Instytut Energetyki Ciepłej, Politechnika Poznańska) wyposażonym w następujące urządzenia [6]:

- suszarka konwekcyjna (BINDER E28),
- piec mufłowy (NABERTHERM LT60/12),
- kalorymetr tlenowy (Precyzja-Technik KL-12),
- waga precyzyjna (RADWAG WTC 2000),
- waga analityczna (RADWAG AS 60/220.R2 PLUS).

Badania wykonano zgodnie z obowiązującymi normami:

- PN-EN ISO 18122:2016-01 – Biopaliwa stałe. Oznaczanie zawartości popiołu,
- PN-EN ISO 18123:2016-01 – Biopaliwa stałe. Oznaczanie zawartości części lotnych,
- PN-EN ISO 18125:2017-07 – Biopaliwa stałe. Oznaczanie wartości opałowej,
- PN-EN ISO 18134-1:2025-11 – Biopaliwa stałe. Oznaczanie zawartości wilgoci. Metoda suszarkowa. Część 1: Wilgoć całkowita. Metoda referencyjna.

Parametr fixed carbon (FC), czyli węgiel związany pozostający po wydzieleniu części lotnych, stanowi kluczowy wskaźnik efektywności paliwa stałego (1). Wysoka zawartość FC oznacza większą ilość energii możliwą do uzyskania z danego wsadu, dłuższy czas spalania oraz bardziej stabilny proces cieplny. Dla mobilnych jednostek grzewczych, szczególnie w sytuacjach awaryjnych, stabilność spalania i przewidywalność charakterystyki cieplnej paliwa ma zasadnicze znaczenie. Biomasa o niskiej zawartości FC (np. niektóre frakcje roślinne) może wymagać modyfikacji systemu spalania lub mieszania z paliwem o wyższej wartości opałowej. Parametr dla paliw stałych (zaliczyć do nich możemy biomasę, jeśli pod takim kątem jest ona analizowana) wylicza się z równania:

$$FC [\%] = 100\% - (M + A + V_m) \quad (1)$$

gdzie:

M – zawartość wilgoci całkowitej w paliwie [%],

A – zawartość popiołu w paliwie [%],

V_m – zawartość części lotnych w paliwie [%].

Wilgoć całkowitą (M) oznacza się metodą suszarkową. Polega ona na suszeniu próbki paliwa powietrzno-suchego w atmosferze powietrza, w temperaturze około 378–388 K (105–115°C), w suszarce elektrycznej z termostatyczną regulacją temperatury. Do oznaczania stosuje się paliwo rozdrobnione do ziaren poniżej 0,2 mm (próba analityczna) w ilości około 1 g. Suszenie prowadzi się przez minimum 90 min dla biomasy. Następnie naczynko szklane z paliwem zamyka się pokrywką, wyjmuje z suszarki i umieszcza w ekzykatorze, a po ochłodzeniu waży na wadze analitycznej. Suszenie jest powtarzane w odstępach 15-minutowych do ustalenia się masy z dokładnością do $\pm 0,001$ g. Zawartość wilgoci w próbce oblicza się ze wzoru:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_p} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

gdzie:

M – wilgoć analityczna [%],

m_1 – masa początkowa próbki [g],

m_2 – masa końcowa próbki [g],

m_p – masa pojemnika [g].

W celu oznaczenia popiołu (A), który stanowi większość produktów przemian substancji mineralnych, najczęściej stosuje się metody wagowe. Przy ich użyciu, po wyprażeniu w odpowiednich warunkach, określa się masę pozostałości, jaką stanowi popiół w stosunku do próbki pierwotnej (początkowej). Wyróżnia się metody szybkiego i powolnego spopielenia. Wzór na zawartość popiołu w paliwie stałym ma postać:

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

gdzie:

A – zawartość popiołu [%],

m_1 – masa naczynka pustego [g],

m_2 – masa naczynka z próbką paliwa stałego [g],

m_3 – masa naczynka z pozostałością po spopieleniu próbki paliwa stałego [g].

Części lotne (V_m) są produktami rozkładu paliwa podczas jego ogrzewania bez dostępu tlenu. Ilość części lotnych powstających w określonych warunkach w procesie odgazowania (pirolizy) jest najbardziej uniwersalnym wskaźnikiem technicz-

nym dla energetycznego stosowania biomasy. Części lotne zależą od struktury chemicznej biomasy i maleją w miarę wzrostu stopnia jej uwęglenia. Duża zawartość części lotnych wpływa korzystnie na parametry zapłonu węgla (temperatura, czas zwłoki zapłonu), obniża jednak jego wartość opałową. Części lotne oznacza się przez wytłewanie (prażenie) próbki paliwa w określonych warunkach w zamkniętym tyglu, a określenie zawartości części lotnych odbywa się metodą wagową. Równanie na zawartość części lotnych ma postać:

$$V_m = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_p} \cdot 100\% \right) - M \quad [\%] \quad (4)$$

gdzie:

V_m – zawartość części lotnych [%],

M – wilgotność całkowita w stanie analitycznym [%],

m_1 – masa początkowa próbki [g],

m_2 – masa końcowa próbki [g],

m_p – masa pojemnika [g].

Proces analizy technicznej biomasy stałej w zakresie zawartości popiołu, części lotnych i zawartości wilgoci całkowitej pozwala z wykorzystaniem równania (1) oszacować zawartość węgla związanego w badanej próbce. Suma wszystkich składników w analizie powinna wynosić 100%.

2.4. Wyniki badań

Poniższa tabela przedstawia wybrane parametry techniczne zbadanych rodzajów biomasy w stanie surowym (zaraz po pozyskaniu z produkcji leśnej) w oparciu o zgromadzony materiał badawczy:

Tabela 4

Analiza techniczna wybranej biomasy

Rodzaj biomasy	Wilgotność	Popiół	Substancje lotne	FC	Ciepło spalania	Wartość opałowa
	[%]				[MJ/kg]	
Sosna zwyczajna (<i>Pinus silvestris</i> L.) Drewno bielaste	12,00	1,48	74,30	12,22	19,80	18,40
Sosna zwyczajna (<i>Pinus silvestris</i> L.) Drewno twarde- lowe	8,70	1,13	74,23	15,94	20,30	19,10

Modrzew europejski (<i>Larix decidua</i> Mill.)	9,73	1,35	73,85	14,94	20,10	18,90
Świerk pospolity (<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst)	13,64	2,07	73,96	10,43	19,50	18,00
Brzoza brodawkowata (<i>Betula pendula</i> Roth)	14,41	4,48	72,90	8,21	19,40	17,80
Buk zwyczajny (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	13,82	2,56	70,92	12,69	19,70	18,20
Dąb bezszypułkowy (<i>Quercus petraea</i> (Matt.) Liebl.)	10,00	2,99	69,00	18,01	20,20	18,90
Olsza czarna (<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.)	11,96	2,86	71,04	14,14	19,60	18,20

3. ANALIZA WYKORZYSTANIA BIOMASY NA CELE TWORZENIA WYSP ENERGETYCZNYCH

Konwersja biomasy na energię stanowi jeden z kluczowych elementów budowy lokalnych wysp energetycznych, rozumianych, jako wydzielone systemy wytwarzania i dystrybucji energii, zdolne do autonomicznej pracy względem np. krajowej sieci elektroenergetycznej. W warunkach rosnących wymagań dotyczących redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększania bezpieczeństwa energetycznego, technologie oparte na biomase stają się istotnym komponentem transformacji energetycznej, szczególnie na obszarach o znacznym potencjale surowcowym.

Do podstawowych technologii konwersji biomasy wykorzystywanych w strukturach wysp energetycznych należą instalacje fermentacji beztlenowej (biogazownie), kotły na biomasę stałą oraz układy kogeneracyjne i trigeneracyjne (CCHP – ang. *Combined Cooling, Heating and Power*).

3.1. Biogazownie, jako źródło energii procesowej

Proces przetwarzania biomasy w biogazowniach opiera się na fermentacji beztlenowej materii organicznej. Substraty organiczne ulegają rozkładowi w kontrolowanych warunkach, czego efektem jest powstanie biogazu zawierającego głównie me-

tan (CH_4) i dwutlenek węgla (CO_2). Biogaz może być spalany w agregatach kogeneracyjnych, produkując energię elektryczną oraz ciepło [7]. Na rys. 1 pokazano pochodnię awaryjnego spalania biogazu.



Rys. 1. Pochodnia awaryjnego spalania biogazu [źródło własne]

W kontekście wysp energetycznych biogazownie pełnią funkcję źródła stabilnego i regulowalnego, umożliwiającego bilansowanie systemu w okresach zwiększonego zapotrzebowania na energię. W przeciwieństwie do źródeł zależnych od warunków pogodowych, produkcja energii z biogazu może być planowana i sterowana w sposób ciągły. Dodatkową korzyścią jest zagospodarowanie odpadów organicznych oraz ograniczenie emisji metanu do atmosfery. Ograniczenia obejmują wysokie koszty inwestycyjne, konieczność zapewnienia stabilnych dostaw substratu, co w realiach ciągłej produkcji leśnej nie powinno stanowić poważnego problemu. W trakcie eksploatacji systemu, należy utrzymywać odpowiednie parametry procesu fermentacji w celu zachowania jak najwyższych parametrów energetycznych układu.

3.2. Kotły na biomasę i kogeneracja

Kotły na biomasę umożliwiają spalanie paliw stałych, takich jak drewno, zrębki czy pelety. Energia chemiczna zawarta w paliwie przekształcana jest w energię cieplną, wykorzystywaną do ogrzewania obiektów lub – w układach wysokotemperaturowych – do produkcji energii elektrycznej [8].

W systemach kogeneracyjnych (CHP – ang. *Combined Heating and Power*) jednocześnie wytwarzana jest energia elektryczna i ciepło użytkowe, co pozwala osiągnąć sprawność całkowitą przekraczającą 80–85%, w zależności od technologii i parametrów paliwa. Takie rozwiązanie znacząco zwiększa efektywność wykorzystania biomasy w porównaniu z rozdzielną produkcją energii.

Efektywność spalania uzależniona jest jednak, od jakości paliwa jego wilgotności, zawartości popiołu, wartości opałowej oraz jednorodności frakcji. Zmienność parametrów może wpływać na stabilność pracy instalacji, intensywność osadzania zanieczyszczeń oraz poziom emisji. Na rys. 2 przedstawiono przykładowy układ stacji kogeneracyjnej spalającej biogaz.



Rys. 2. Zespół kogeneracyjny (SSp + PE) zasilanego biogazem [źródło własne]

3.3. Trigeneracja (CCHP) w strukturze wyspy energetycznej

Rozwinięciem kogeneracji jest trigeneracja (CCHP), polegająca na jednoczesnej produkcji energii elektrycznej, ciepła oraz chłodu w jednym zintegrowanym systemie. W układach tych ciepło odpadowe z procesu wytwarzania energii elektrycznej wykorzystywane jest nie tylko do ogrzewania, lecz także do zasilania agregatów absorpcyjnych lub adsorpcyjnych, produkujących chłód technologiczny.

W kontekście wysp energetycznych trigeneracja znacząco zwiększa stopień wykorzystania energii pierwotnej zawartej w biomase, ograniczając straty i poprawiając ekonomikę systemu. Produkcja chłodu może mieć zastosowanie w obiektach administracyjnych, magazynowych, centrach przetwarzania danych czy infrastrukturze wymagającej kontrolowanych warunków temperaturowych. W okresie letnim, gdy

zapotrzebowanie na ciepło maleje, możliwość konwersji nadwyżek energii cieplnej na chłód poprawia bilans energetyczny całego układu.

Zastosowanie trigeneracji w wyspach energetycznych zwiększa ich elastyczność operacyjną, umożliwia lepsze dopasowanie produkcji do zmiennego zapotrzebowania oraz podnosi ogólną sprawność systemu, która w sprzyjających warunkach może przekraczać 85–90%. Wymaga to jednak bardziej zaawansowanych systemów sterowania, integracji z magazynami energii oraz dokładnej analizy profilu zapotrzebowania na energię elektryczną, ciepłą i chłodniczą.

3.4. Uwarunkowania ekonomiczne i systemowe

Wdrożenie technologii biomasowych w formule kogeneracyjnej lub trigeneracyjnej wiąże się z koniecznością poniesienia znacznych nakładów inwestycyjnych, jednak w długiej perspektywie może prowadzić do obniżenia kosztów operacyjnych oraz zwiększenia niezależności energetycznej. Kluczowe znaczenie ma zapewnienie stabilnego łańcucha dostaw biomasy, odpowiednia infrastruktura magazynowa oraz optymalizacja logistyki transportu.

Integracja źródeł biomasowych z systemami magazynowania energii oraz innymi odnawialnymi źródłami (np. fotowoltaiką) pozwala na stworzenie hybrydowych wysp energetycznych o wysokiej odporności na zakłócenia zewnętrzne. W takim układzie biomasa, szczególnie w systemach kogeneracyjnych i trigeneracyjnych, pełni funkcję stabilnego, sterowalnego źródła bazowego.

Podsumowując, rozszerzenie klasycznych technologii spalania i fermentacji o rozwiązania kogeneracyjne i trigeneracyjne istotnie zwiększa efektywność energetyczną oraz funkcjonalność wysp energetycznych. Pozwala to nie tylko na redukcję emisji i ograniczenie zależności od paliw kopalnych, lecz również na optymalne wykorzystanie lokalnych zasobów biomasy w sposób zintegrowany i systemowy.

4. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza techniczna wybranych gatunków biomasy drzewnej z obszaru RDLP w Szczecinku potwierdziła ich przydatność, jako paliwa energetycznego w systemach lokalnych wysp energetycznych. Uzyskane wartości ciepła spalania i wartości opałowej mieszczą się w typowych zakresach dla biomasy drzewnej, wskazując na stabilny potencjał energetyczny analizowanych surowców. Najkorzystniejszymi parametrami energetycznymi charakteryzowały się drewno twarde sosny oraz dąb bezszypułkowy, co wiąże się z wyższą zawartością węgla związanego i relatywnie niską wilgotnością.

Istotnym czynnikiem wpływającym na efektywność energetyczną biomasy pozostaje jej wilgotność oraz zawartość popiołu, które determinują wartość opałową paliwa

oraz przebieg procesu spalania. W praktyce oznacza to konieczność odpowiedniego przygotowania paliwa, w tym jego sezonowania oraz selekcji frakcji przeznaczonych do konwersji energetycznej.

Analiza zasobów drzewnych oraz poziomu pozyskania drewna w RDLP w Szczecinku wykazała, że jednostka dysponuje stabilną i znaczącą bazą surowcową dla rozwoju lokalnych systemów energetycznych opartych na biomase.

Wyniki badań wskazują, że biomasa drzewna dostępna w strukturach Lasów Państwowych może stanowić stabilną podstawę lokalnych systemów energetycznych opartych na technologiach spalania, kogeneracji oraz trigeneracji. Rozwiązania te mogą zwiększać efektywność wykorzystania energii pierwotnej oraz przyczyniać się do poprawy bezpieczeństwa energetycznego infrastruktury leśnej.

Z perspektywy systemowej koncepcja tworzenia autonomicznych wysp energetycznych w strukturach RDLP, a w dalszej perspektywie ich integracji w archipelagi energetyczne, stanowi racjonalny kierunek rozwoju infrastruktury energetycznej obszarów leśnych, szczególnie w kontekście rosnących wymagań dotyczących odporności systemów energetycznych na sytuacje kryzysowe.

LITERATURA

1. Jankowska, M., Kinalska, D., Ciupek, B. 2025. Wykorzystanie biomasy w bazach lotniczych do zapewnienia energii w sytuacjach kryzysowych. W: Konferencja Naukowo-Techniczna „Ostatni rok eksploatacji Su-22 i nowe perspektywy”, Świdwin, Polska, s. 171–182.
2. Demirbaş, A. 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>.
3. Telmo, C., & Lousada, J. 2011. Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2634–2639. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.043>.
4. Obernberger, I., Thek, G. 2010. *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets*. London–Washington: Earthscan / Routledge.
5. Friedl, A., Padouvas, E., Rotter, H., Varmuza, K. 2005. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*, 544(1–2), 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.01.041>.
6. Ciupek B. 2022. *Laboratorium spalania paliw kopalnych i biomasy*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, ISBN 978-83-7775-666-9.
7. Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press / Elsevier, Burlington.
8. Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles Jr., T.R., Miles, T.R. 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54(1–3), 17–46. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3).

PODZIĘKOWANIA

Autorzy składają serdeczne podziękowania Dyrektorowi Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Szczecinku, Panu Sławomirowi Cichoniowi, za pomoc oraz udostępnienie materiałów badawczych.

Badania laboratoryjne zrealizowano dzięki Dotacji Statutowej, Politechniki Poznańskiej. Projekt badawczy: *Analiza procesów ciepłno-przepływowych w wybranych elementach maszyn energetycznych i lotniczych w aspektach ich parametrów ekologicznych*, nr: 0712/SBAD/5298, kierownik projektu badawczego: dr inż. Bartosz Ciupek.

ENERGY POTENTIAL OF WOODY BIOMASS IN CREATING ENERGY ISLANDS FOR STRATEGIC AREAS

Abstract

This article presents a technical analysis of selected woody biomass fractions from the area of the Regional Directorate of State Forests in Szczecinek, conducted to assess their energy performance and suitability for use in local energy generation systems. An additional objective was to determine the potential of woody biomass in the context of creating energy islands for State Forest units based on this energy resource. The paper discusses key technological aspects of biomass-to-energy conversion, with particular emphasis on cogeneration plants and trigeneration concepts, and also provides a preliminary risk and cost-effectiveness assessment of such solutions. The classification of forest areas as critical infrastructure, strongly linked to the resilience of the energy system to crisis situations, necessitates a review of the current energy systems used in forest administration facilities. Creating energy islands and then connecting them into energy archipelagos within individual Regional Directorates of State Forests is one of the most sensible actions that can be implemented at this time, given the current geopolitical situation and the new approach to resolving crisis situations. Furthermore, the importance of energy self-sufficiency and the resilience of forest infrastructure in crisis situations was highlighted.

Keywords: biomass, renewable energy, calorific value, technical parameters of biomass, forest biomass resources

Konferencja w ramach cyklu NAUKA DLA OBRONNOŚCI
MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA CZYSTEJ ENERGII W SYSTEMACH
BEZPIECZEŃSTWA PAŃSTWA. SZANSE, OGRANICZENIA,
PERSPEKTYWY

Agnieszka IWAN^{*,**}
Ireneusz PLEBANKIEWICZ*
Wojciech PRZYBYŁ*
Marcin SZCZEPANIAK*
Krzysztof A. BOGDANOWICZ*
Witalis PELLOWSKI^{**}

INNOWACYJNE MODUŁOWE URZĄDZENIA ENERGETYCZNE OPARTE NA INTEGRACJI OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH, TURBIN WIATROWYCH ORAZ MAGAZYNÓW ENERGII

Celem artykułu jest przedstawienie wytworzonych w WITI innowacyjnych modułowych urządzeń energetycznych opartych na integracji ogniw fotowoltaicznych, turbin wiatrowych oraz magazynów energii dla zastosowań podwójnych. Skonstruowano ładowarki słoneczne o różnych gabarytach w tym także modułowe ładowarki słoneczne do zasilania zestawu minersko-rozpoznawczego oraz modułową zapalarkę solarną. Ponadto, wytworzono modułowy system wytwarzania i magazynowania energii elektrycznej o poziomie gotowości technologicznej TRL = 9 w oparciu o moduły fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe i akumulatory oraz mobilny system polowej elektrowni fotowoltaicznej. Proponowane rozwiązania obejmują budowę skalalnych i łatwych w instalacji modułów charakteryzujących się wysoką mobilnością i różnorodnością zastosowania, co pozwala na ich wykorzystanie zarówno w sektorze cywilnym jak i w zastosowaniach związanych z bezpieczeństwem państwa.

Słowa kluczowe: modułowe ładowarki słoneczne, modułowa zapalarka solarna, zestaw minersko-rozpoznawczy, modułowo-hybrydowa instalacja

* Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej, Wrocław (WITI)

** Instytut Inżynierii Bezpieczeństwa, Wydział Nauk o Bezpieczeństwie, Akademia Wojsk Lądowych, Wrocław (AWL)

1. WPROWADZENIE

Obecne rozwiązania dotyczące urządzeń energetycznych opartych na odnawialnych źródłach energii często charakteryzują się ograniczoną mobilnością, brakiem integracji różnych technologii w jednym systemie oraz niewystarczającą zdolnością pracy w trybie autonomicznym. Dlatego kluczowym jest opracowanie kompaktowych, modułowych systemów/urządzeń energetycznych, które mogą być szybko wdrażane w różnych warunkach środowiskowych i infrastrukturalnych.

Proponowane w ramach prowadzonych badań wdrożeniowych w Wojskowym Instytucie Techniki Inżynierskiej (WITI) rozwiązania odpowiadają na obecne zapotrzebowanie w zakresie bezpieczeństwa energetycznego i są przeznaczone do zastosowań zarówno cywilnych jak i strategicznych (dual-use) wspierając tym samym rozwój ekologicznych technologii energetycznych. Skonstruowano na poziomie gotowości technologicznej TRL = 9:

- ładowarki słoneczne o różnych gabarytach w oparciu o ogniwa słoneczne różnych generacji oraz różne magazyny energii (w tym także rozwiązania hybrydowe),
- modułowe, elastyczne ładowarki słoneczne do zasilania zestawu minersko-rozpoznawczego,
- modułową zapalarkę solarną,
- modułowy system wytwarzania i magazynowania energii elektrycznej w oparciu o moduły fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe i akumulatory,
- mobilny system polowej elektrowni fotowoltaicznej.

Ponadto, w WITI jak i w Akademii Wojsk Lądowych (AWL) prowadzone są prace teoretyczno-koncepcyjne dotyczące analizy obecnych rozwiązań w zakresie bezpieczeństwa energetycznego i ekologicznego. Prowadzone prace mają na celu opracowywanie nowych wytycznych, metodyk, wymagań funkcjonalno-użytkowych jak i konstrukcje nowych/innowacyjnych urządzeń czy podzespołów. Głównym celem prowadzonych badań naukowych jest zastosowanie nowych i perspektywicznych technologii dla bezpieczeństwa i obronności.

2. OBECNY STAN TECHNIKI (STATE OF THE ART)

Rozwój technologii odnawialnych źródeł energii (OZE) w ostatnich latach koncentruje się na zwiększeniu udziału fotowoltaiki i energetyki wiatrowej w miksie energetycznym, przy jednoczesnym ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych [Samy i Güven 2025, Mazzeo et al. 2021, Manas et al. 2023]. Pojedyncze źródła OZE charakteryzują się jednak znaczną zmiennością produkcji energii, co wymaga stosowania systemów magazynowania energii oraz inteligentnego zarządzania energią [Putri, Ge

i Khazaei 2024; Han et al. 2019; Rahman, Suha i Ahmed 2024]. Dlatego też hybrydowe systemy energetyczne integrujące fotowoltaikę i turbiny wiatrowe z magazynami energii są dość szeroko analizowane. Integracja kilku źródeł pozwala poprawić stabilność dostaw energii i zwiększyć efektywność systemów rozproszonych [Dawsari, Anayi i Packianather 2024, Thango i Obokoh 2024]. Ponadto, jednym z kluczowych elementów nowoczesnych hybrydowych systemów energetycznych są systemy magazynowania energii. Baterie litowo-jonowe są obecnie dominującym rozwiązaniem, ze względu na wysoką gęstość energii, sprawność oraz względnie długą żywotność [Ngoy et al. 2025]. Aczkolwiek, należy także wspomnieć o atutach baterii sodowo-jonowych jako alternatywie dla baterii litowo-jonowych [Iwan et al. 2025]. Akumulatory Na-ion są bezpieczniejsze w użyciu niż ich litowe odpowiedniki i umożliwiają rozładowanie do 0 V, eliminując możliwość niekontrolowanego rozładowania termicznego w wyniku zwarcia (wybuchu, zapłonu), co jest szczególnie ważne w wojsku i ma strategiczne znaczenie dla przyszłości operacji wojskowych jako systemy magazynowania energii.

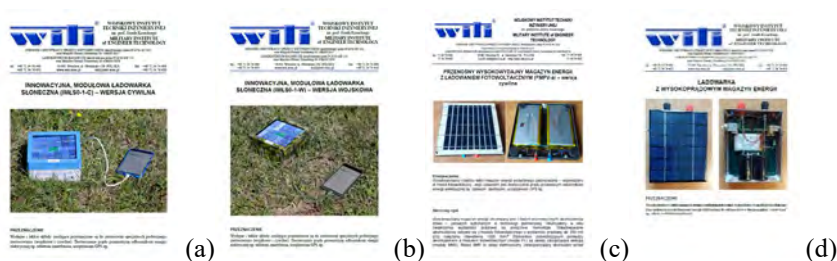
3. SKONSTRUOWANE MODUŁOWE URZĄDZENIA ENERGETYCZNE

Skonstruowane w WITI urządzenia są skalowalne, mobilne, zdolne do pracy w trybie autonomicznym, oraz łatwe w instalacji i rozbudowie. Zalety ich użycia w wojsku dotyczą takich aspektów jak:

- niezależność energetyczna żołnierzy i oddziałów w terenie,
- ograniczenie konieczności transportu paliwa i baterii, co zmniejsza obciążenie logistyczne,
- cicha praca (brak emisji hałasu), co zwiększa skrytość działań,
- możliwość ładowania sprzętu (łączność, GPS, sensory) w warunkach polowych,
- wysoka mobilność i łatwość rozkładania systemu,
- mniejsze ryzyko wykrycia w porównaniu do agregatów spalinowych (brak emisji spalin i sygnatury cieplnej),
- niższe koszty eksploatacyjne przy długotrwałym użytkowaniu.

3.1. Modułowe ładowarki słoneczne na bazie ogniw słonecznych i superkondensatorów

W WITI skonstruowano różne rodzaje ładowarek słonecznych na bazie krzemowych i barwnikowych ogniw słonecznych oraz superkondensatorów w wersji bez i z kamuflażem (rys. 1a i 1b). Kluczowe rozwiązania zostały opatentowane [Plebankiewicz, Bogdanowicz i Iwan 2020] i opublikowane [Plebankiewicz, Bogdanowicz i Iwan 2020, Plebankiewicz et al. 2023, Plebankiewicz et al. 2024].



Rys. 1. Karty produktu modułowych ładowarek słonecznych z superkondensatorem w wersji cywilnej (a) i wojskowej (b) oraz lekkiej ładowarki słonecznej z: akumulatorem (c) i z akumulatorem i superkondensatorem (d)

3.2. Ładowarki słoneczne na bazie ogniw słonecznych i baterii litowo-jonowych oraz hybrydowych magazynów energii

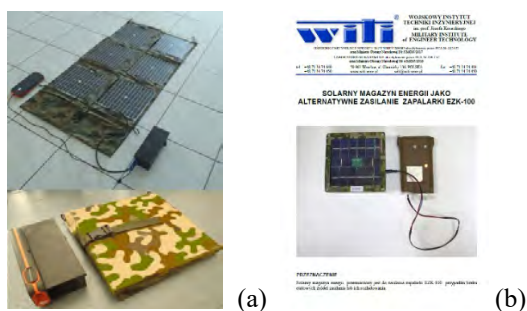
W WITI skonstruowano wydajną (80%) i lekką (540 g) ładowarkę słoneczną (rys. 1c) na bazie krzemowych ogniw słonecznych o sprawności $PCE = 18\%$ i baterii litowo-jonowych (akumulatora) implementując dodatkowo układ BMS (Battery Management System) zabezpieczający przed przeładowaniem oraz przetwornicę typu „step up” w celu podniesienia napięcia max. do 30 V. Szczegóły proponowanego rozwiązania opublikowano [Małczek et al. 2020].

W WITI wytworzono lekką hybrydową ładowarkę słoneczną na bazie ogniw słonecznych i baterii litowo-jonowych oraz superkondensatorów (rys. 1d). Ładowarka dzięki wyposażeniu jej w superkondensator umożliwia chwilowe pobory dużych prądów (większych niż dopuszczalne prądy akumulatora) i może mieć zastosowanie w zasilaniu odbiorników w których występują duże prądy startowe np. niektóre typy silników elektrycznych. Otrzymane wyniki potwierdzają dużą sprawność skonstruowanego układu do zachowania energii – 54 % po 12 godzinach bez doładowywania. Proponowane rozwiązanie jest innowacyjne bo przy zachowaniu niewielkiej wagi (27g) i małych wymiarów ($135 \times 110 \times 32$ mm) ładowarki pozwala na uzyskanie bardzo dużych prądów chwilowych, co jest niemożliwe bez zastosowania superkondensatorów. Jednocześnie zastosowanie superkondensatorów zwiększa trwałość akumulatora, który tylko doładowuje energię gromadzoną w superkondensatorach.

3.3. Modułowa ładowarka słoneczna do zasilania zestawu minersko-rozpoznawczego

Istotą działania modułowej ładowarki słonecznej do zasilania zestawu minersko-rozpoznawczego (rys. 2a) jest zarządzanie energią elektryczną pozyskiwaną z modułów fotowoltaicznych i superkondensatorów w zależności od warunków atmosferycznych.

rycznych. Całość zamontowana jest w obudowie z wyprowadzonymi złączami spełniającymi normę IP68. Ładowarka umożliwia zasilanie bezpośrednie (bez powerbanku) urządzeń elektrycznych poprzez złącze microUSB napięciem 5V i natężeniem prądu nieprzekraczającym 1A. Modułowa budowa zapewnia możliwość implementacji różnych rodzajów ładowarki w zakresie maskowania zarówno w wersji podstawowej (wzór środkowoeuropejski) jak i pustynnej. Sprzyja to łatwiejszemu dostosowaniu do warunków pracy i wymagań stawianym sprzętowi wojskowemu w zakresie maskowania. Umożliwia zasilanie dowolnego urządzenia zasilanego z gniazda 12V typu Jack przez około 2 godziny przy poborze prądu nieprzekraczającym 2A, a z gniazda USB 5V przez około 4 godziny przy poborze prądu nieprzekraczającym 2,4A. Szczegóły dotyczące ładowarki opublikowano [Plebankiewicz et al. 2024].



Rys. 2. Modułowa, elastyczna ładowarka słoneczna do zasilania zestawu minersko-rozpoznawczego wytworzona w WITI [16] (a) i karta produktu modułowej zapalarki solarnej (b)

3.4. Modułowa zapalarka solarna

Zapalarka elektryczna TZK100 zasilana jest bateriami R10. Największym utrudnieniem dla żołnierzy jest procedura pobierania baterii, które zużywają się szybko. W odpowiedzi na zaistniałą potrzebę w WITI skonstruowano modułową zapalarkę solarną (rys. 2b) z której wyeliminowano baterie R10 i wprowadzono moduł fotowoltaiczny. Opracowane rozwiązania zostały opatentowane [Plebankiewicz, Bogdanowicz i Iwan 2020, Plebankiewicz et al. 2022, Plebankiewicz et al. 2022]. Szczegóły dotyczące proponowanego rozwiązania opublikowano [Plebankiewicz et al. 2025, Plebankiewicz et al. 2023].

3.5. Hybrydowy system wytwarzania i magazynowania energii na bazie paneli fotowoltaicznych, turbin wiatrowych i akumulatorów oraz mobilny system polowej elektrowni fotowoltaicznej

Ideą proponowanego rozwiązania na bazie paneli fotowoltaicznych (rys. 3), turbin wiatrowych i akumulatorów jest możliwość projektowania hybrydowej instalacji tzw. „szytej na miarę użytkownika/klienta”, który w zależności od zastosowania instalacji może indywidualnie projektować urządzenie na miarę swoich potrzeb. Zakłada się wykorzystanie różnych mediów transmisyjnych, w tym kanałów internetowych. W wariantcie militarnym proponowana instalacja zawiera akumulatory kwasowe czy zasadowe. Szczegóły proponowanego rozwiązania opublikowano [Maleczek, Szczepaniak i Malicki 2019].

Skonstruowana polowa elektrownia słoneczna (rys. 3), działająca jako autonomiczny system zasilania, jest urządzeniem przeznaczonym do wytwarzania energii elektrycznej o napięciu 230 V i częstotliwości 50 Hz w oparciu o krzemowe panele fotowoltaiczne i akumulatory. Charakteryzuje się wysoką odpornością na oddziaływania mechaniczne i czynniki środowiskowe i pozwala na wykorzystywanie w trudnych i wymagających warunkach terenowych. Szczegóły proponowanego rozwiązania opublikowano [Szczepaniak i Maleczek 2017, Iwan et al. 2018].



Rys. 3. Widok zaimplementowanych na poligonie WITI zestawów modułów fotowoltaicznych, mobilne bloki fotowoltaiczne i mobilny system polowej elektrowni fotowoltaicznej

4. KAMUFLAŻ I MASKOWANIE ŁADOWAREK SŁONECZNYCH

WITI od wielu lat specjalizuje się w technice kamuflażu i maskowania dla zastosowań wojskowych obejmującej różne scenerie (las iglasty, liściasty, mieszany, teren zurbanizowany, pustynny, półpustynny, skalisty, stepowy), pory roku (wiosna, lato, jesień, zima bezśnieżna, zima śnieżna) czy metody obserwacji (oko nieuzbrojone VIS, lornetka, noktowizor NV, bliska podczerwień NIR). Posiadaną wiedzę zastosowano z sukcesem do maskowania ładowarek solarnych. Opracowano dwa typy kamuflażu pikselowego. W celu określenia stopnia widoczności obiektów posłużono się po-

wszechnie używaną nomenklaturą w rozpoznaniu obejmującą: brak, wykrycie, rozpoznanie i identyfikacja obiektu. Obserwacji dokonywano z odległości 10, 15 i 20 m. Szczegółowe informacje opublikowano [Przybył et al. 2022, Przybył et al. 2023].

5. OCHRONA RADIOLOKACYJNA ŁADOWAREK SŁONECZNYCH

Kolejnym innowacyjnym krokiem po skonstruowaniu wydajnych i zamaskowanych ładowarek słonecznych było określenie ich ochrony radiolokacyjnej w celu uniezwolnienia wykrycia przez radary tzw. technika pozoracji. Technika stealth obecnie dotyczy głównie zmniejszenia echa radarowego, emisji podczerwieni i hałasu samolotów, okrętów oraz pojazdów lądowych. Obiektywna metoda pomiaru właściwości tłumienności mikrofalowej jest podstawą do określania skuteczności maskowania przed rozpoznaniem radarowym i może dotyczyć obiektów o znaczeniu zarówno strategicznym, operacyjnym czy taktycznym, w tym także ładowarek słonecznych. Szczegółowe wyniki badań opublikowano [Przybył et al. 2024, Plebankiewicz et al. 2024, Przybył et al. 2023].

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Skonstruowane w WITI w oparciu o innowacyjną koncepcję wdrożeniowo-naukową modułowe urządzenia energetyczne o małych i dużych gabarytach są obecnie gotowe do wdrożenia. Propozycję zastosowania wojskowego dla wytworzonych urządzeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Proponowane zastosowania dla wytworzonych modułowych urządzeń energetycznych o TRL 9

Urządzenie	Zastosowanie w wojsku
Modułowe ładowarki słoneczne w wersji z kamuflażem na bazie ogniw słonecznych i magazynów energii	do podładowania tabletu, smartfonu prądem 2A (tzw. szybkie ładowanie)
Modułowe ładowarki słoneczne do zasilania zestawu minersko-rozpoznawczego na bazie ogniw słonecznych i supekondensatorów	do zasilania zestawu minersko-rozpoznawczego
Modułowe ładowarki słoneczne na bazie ogniw słonecznych i baterii litowo-jonowych	przy wyposażeniu w przetwornice napięcia, ciągle zasilanie sprzętu mobilnego
Modułowa zapalarka solarna na bazie ogniw słonecznych i supekondensatorów	inicjowanie zapłonu zespołów zapalających do 100 zapalników elektrycznych ERG połączonych w elektryczną sieć wybuchową
Mobilny system polowej elektrowni fotowoltaicznej na bazie ogniw słonecznych i akumulatorów	odporne na oddziaływania mechaniczne i czynniki środowiskowe źródło zasilania infrastruktury wojskowej w trudnych i wymagających warunkach terenowych
Hybrydowy system wytwarzania i magazynowania energii na bazie paneli fotowoltaicznych, turbin wiatrowych i akumulatorów	odporne na oddziaływania mechaniczne i czynniki środowiskowe źródło zasilania infrastruktury wojskowej w trudnych i wymagających warunkach terenowych

LITERATURA

1. Samy M. M., Güven A. F., 2025, Optimal dimensioning of grid connected PV/wind hybrid renewable energy systems with battery and supercapacitor storage, *Sci. Rep.*, 15, Art. 45658.
2. Mazzeo D., Matera N., De Luca P., Baglivo C., Congedo P. M., Oliveti G., 2021, A literature review and statistical analysis of photovoltaic-wind hybrid renewable system research by considering the most relevant 550 articles: An upgradable matrix literature database, *J. Clean. Prod.*, 295, 126070.
3. Manas M., Sharma S., Reddy K.S., Srivastava A., 2023, A critical review on techno-economic analysis of hybrid renewable energy resources-based microgrids, *J. Eng. Appl. Sci.*, 70.
4. Putri S. A., Ge X., Khazaei J., 2024, Economic dispatch and power flow analysis for microgrids, *arXiv*, 2411.19279.

5. Han J., Yan L., Zhang L., Paaso A., Bahramirad S., Li Z., 2019, A multi-timescale two-stage robust grid-friendly dispatch model for microgrid operation, arXiv, 1912.06587.
6. Rahman I., Suha F., Ahmed A., 2024, Optimal sizing of hybrid renewable energy based microgrid system, arXiv, 2403.01602.
7. Al Dawsari S., Anayi F., Packianather M., 2024, Techno-economic analysis of hybrid renewable energy systems for cost reduction and reliability improvement using dwarf mungoose optimization algorithm, *Energy*, 313, 133653.
8. Thango B. A., Obokoh L., 2024, Techno-economic analysis of hybrid renewable energy systems for power interruptions: A systematic review, *Eng.*, 5, 2108-2156.
9. Ngoy K. R., Lukong V. T., Yoro K. O., Makambo J. B., Chukwuati N. C., Ibegbulam C., Eterigho-Ikelegbe O., Ukoba K., Jen T-C., 2025, Lithium-ion batteries and the future of sustainable energy: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 223, 115971.
10. Iwan A., Bogdanowicz K.A., Pich R., Gonciarz A., Miedziak J., Plebankiewicz I., Przybył W., 2025, The safety engineering of sodium-ion batteries used as an energy storage system for the military, *Energies*, 18, 978.
11. Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Iwan A., 2020, Układ elektroniczny ładowarki superkondensatorów z ogniw słonecznych, patent nr P.432868.
12. Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Iwan A., 2020, Photo-rechargeable electric energy storage systems based on silicon solar cells and supercapacitor-engineering concept, *Energies*, 13, 3867.
13. Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Kwasnicki P., Skunik-Nuckowska M., Raczka P. M., Kulesza P., Iwan A., Przybył W., 2023, Solar chargers based on new dye-based photovoltaic modules and new supercapacitors *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 71(4), e146452.
14. Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Kwasnicki P., Przybył W., Skunik-Nuckowska M., Kulesza P. J., Iwan A., 2023, Inorganic–organic modular silicon and dye-sensitized solar cells and predicted role of artificial intelligence towards efficient and stable solar chargers based on supercapacitors, *Scientific Reports*, 14, 6115.
15. Maleczek S., Drabczyk K., Bogdanowicz K. A., Iwan A., 2020, Engineering concept of energy storage systems based on new type of silicon photovoltaic module and lithium ion batteries, *Energies*, 13, 3701.
16. Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Przybył W., Wysoczański A., Iwan A., Gorecki K., 2024, Solar charger with power pack on camouflage fabric for field application, *Scientific Reports*, 14, 30262.
17. Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Iwan A., 2020, Układ elektroniczny ładowarki superkondensatorów z ogniw słonecznych, patent nr P.432868.
18. Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Iwan A., Przybył W., 2022, Układ elektroniczny zapalarki słonecznej, patent nr P.440970.
19. Plebankiewicz I., Wysoczański A., Bogdanowicz K. A., Iwan A., 2022, Układ elektroniczny ładowarki fotowoltaicznej, patent nr P.442208.
20. Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Przybył W., Gorecki K., Iwan A., 2025, Stable temperature operation in various climatic zones of a solar igniter based on solar modules, supercapacitors, polymer lithium-ion batteries and shot capacitors, *Journal of Energy Storage* 111, 115353.

21. Plebankiewicz I., Przybył W., Bogdanowicz K. A., Iwan A., 2023, Modułowość zaparkarki solarnej MZS100, a jej podatność na optymalizację, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 99 NR 10/2023, 224-228.
22. Maleczek S., Szczepaniak M., Malicki W., 2019, Hybrydowy system magazynowania energii podwójnego zastosowania, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 1/2019 (121), 1-5.
23. Szczepaniak M., Maleczek S., 2017, Systemy fotowoltaiczne do zastosowania w aplikacjach militarnych, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, 1 (113), 73-79.
24. Iwan A., Januszko A., Maleczek S., Mrocza J., 2018, Organiczne oraz elastyczne ogniwa fotowoltaiczne - rzeczywistość i perspektywy, rozdział w *Problemy Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej*, Praca zbiorowa pod redakcją Janusza Mroczy, Komitet Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
25. Przybył W., Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Iwan A., Januszko A., 2022, Rola kamuflażu dla długotrwałego funkcjonowania urządzeń elektrycznych podwójnego zastosowania; *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 98, nr 1, 162-165.
26. Przybył W., Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Iwan A., 2023, Badania radiolokacyjne oraz ochrona elektromagnetyczna obiektów wojskowych, w tym ładowarek słonecznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 99 NR 10/2023, 286-289.
27. Przybył W., Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Kwaśnicki P., Wojciechowski A., Iwan A., 2024, Badania radarowe paneli fotowoltaicznych w kontekście ich ochrony radiolokacyjnej, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, 9/2024, 6-10.
28. Plebankiewicz I., Przybył W., Kwaśnicki P., Bogdanowicz K. A., Iwan A., 2024, Ochrona krzemowych paneli fotowoltaicznych i ładowarek słonecznych przed rozpoznaniem radarowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 100 NR 11/2024, 154-157.
29. Przybył W., Mazurczuk R., Kalinowski A., Bogdanowicz K. A., 2023, Gaussian model of anti-radar properties for coatings based on carbonyl iron powder, *Materials*, 16, 3050.
30. Przybył W., Januszko A., Radek N., Szczepaniak M., Bogdanowicz K. A., Plebankiewicz I., Szczodrowska B., Mazurczuk R., 2023, Microwave absorption properties of carbonyl iron-based paint coatings for military applications, *Defence Technology*, 22, 1-9.

ACKNOWLEDGEMENTS

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) za współfinansowanie projektów: Wydajne i lekkie układy zasilające złożone z ogniwa słonecznego i baterii litowo-jonowej oraz ogniwa słonecznego i superkondensatora przeznaczone do zastosowań specjalnych (2018-2021, nr TECHMATSTRATEG1/347431/14/NCBR/2018), oraz Innowacyjne elastyczne pokrycie fotowoltaiczne (2016-2018, nr GEKON2/O4/268473/23/2016), oraz Hybrydowy system magazynowania i buforowania energii podwójnego zastosowania (2018-2020, nr POIR.04.01.02-00-0099/17-00).

Podziękowania dla Pana dr S. Maleczka za współudział w realizacji projektów i cenne dyskusje.

INNOVATIVE MODULAR ENERGY DEVICES BASED ON THE INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC CELLS, WIND TURBINES, AND ENERGY STORAGE SYSTEMS

Abstract

The aim of this paper is to present innovative modular energy devices developed at WITI, based on the integration of photovoltaic cells, wind turbines, and energy storage systems for dual-use applications. Solar chargers of various sizes were designed and constructed, including modular solar chargers intended to power a mine reconnaissance kit, as well as a modular solar initiator. In addition, a modular system for the generation and storage of electrical energy with a Technology Readiness Level of TRL = 9 was developed, based on photovoltaic modules, wind turbines, and batteries, along with a mobile field photovoltaic power plant system. The proposed solutions involve the development of scalable and easy-to-install modules characterized by high mobility and versatility, enabling their use in both the civilian sector and applications related to national security.

Keywords: modular solar chargers, modular solar initiator, mine reconnaissance kit, modular hybrid installation

Tomasz KARPIŃSKI*

ANALIZA I PORÓWNANIE OSIĄGÓW SILNIKÓW WSPÓLCZESNYCH MYŚLIWCÓW POLSKICH SIŁ ZBROJNYCH W TRAKCIE ZADANIA BOJOWEGO

W pracy zaprezentowano metodykę oceny osiągnięć silników turbinowych w kontekście realizacji misji bojowych. Analizie poddano jednostki napędowe samolotów MiG-29, F-16 Fighting Falcon oraz F-35 Lightning II. Proces badawczy obejmował wyznaczenie punktu pracy, budowę modeli off-design oraz implementację reprezentatywnego profilu misji typu *scramble*. Dla każdego przypadku wykonano obliczenia osiągnięć w funkcji czasu, uwzględniając zmienność warunków lotu. Na tej podstawie wyznaczono parametry syntetyczne opisujące efektywność pracy silnika w całym cyklu misji. Przeprowadzona analiza umożliwiła porównanie konstrukcji w ujęciu operacyjnym. Wykazano, że różnice w architekturze silników istotnie wpływają na ich charakterystyki eksploatacyjne.

Słowa kluczowe: samolot myśliwski, silnik turbinowy dwuprzepływowy z mieszalnikiem, profil misji, porównanie osiągnięć

1. WPROWADZENIE

Transformacja Sił Powietrznych RP w ostatnich latach obejmuje nie tylko wymianę platform bojowych, lecz także skok technologiczny w zakresie systemów napędowych. W niniejszym artykule dokonano porównania parametrów silników stosowanych w samolotach MiG-29, F-16 Fighting Falcon oraz F-35 Lightning II, będących kluczowymi platformami bojowymi użytkowymi obecnie lub planowanymi do wdrożenia w Siłach Powietrznych RP.

Metodologia badawcza opiera się na kilkuetapowym procesie modelowania i symulacji. W pierwszym kroku wyznaczono punkt pracy silnika (*design point*) na podstawie dostępnych danych literaturowych i przyjętych założeń termodynamicznych.

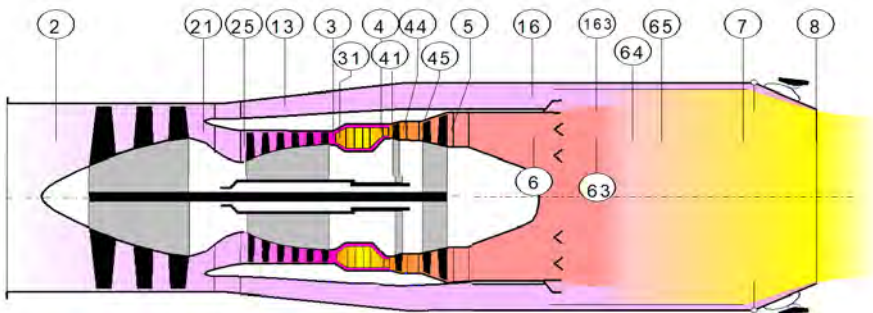
* Instytut Techniki Lotniczej, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

Następnie, z wykorzystaniem monografii Kurzke i Halliwell [2018], opracowano modele *off-design*, umożliwiające analizę zachowania silników w szerokim zakresie warunków lotu i obciążeń. Kolejnym etapem było zdefiniowanie reprezentatywnego profilu misji - start alarmowy - oraz szczegółowe odwzorowanie przebiegu zadania (profil wysokości, prędkości i ciągu w funkcji czasu). Na tej podstawie przeprowadzono obliczenia osiągow w kluczowych momentach z całej misji, wyznaczając kluczowe parametry osiągow, takie jak zużycie paliwa, ciąg użyteczny czy sprawność energetyczną.

Końcowym etapem analizy jest synteza wyników w postaci wskaźników porównawczych, umożliwiających ocenę efektywności energetycznej, zużycia paliwa oraz zdolności do realizacji określonego zadania operacyjnego przez poszczególne konstrukcje.

2. WYZNACZENIE PUNKTU PRACY SILNIKÓW

Pierwszym krokiem w realizacji zagadnienia obliczeń osiągow silnika podczas misji, jest wyznaczenie reprezentatywnego punktu pracy. Punkt ten zostanie później wykorzystany do obliczeń *off-design*, tj. poza punktem pracy do wyznaczenia charakterystyk i przeliczenia wielu punktów czasowych misji. Do obliczeń wykorzystano oprogramowanie GasTurb 14 umożliwiające obliczenia termo-gazo-dynamiczne silników turbinowych oraz realizujące obliczenia na zakresach poza punktem pracy przez pełną misję. Punkt pracy wyliczono przy wykorzystaniu danych (zmodyfikowanych, gdzie było to wymagane) o silnikach z prac Kozakiewicza [2009] oraz Sabzehali, et al. [2022] oraz ogólnodostępnych danych w Internecie, np. z kart produktu. Schemat modelowanego napędu znajduje się na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat dwuprzepływowego silnika turbinowego z mieszalnikiem i dopalaczem z zaznaczonymi przekrojami

Silniki zostały zamodelowane przy wykorzystaniu parametrów z tabeli 1. Ze względu na tajność i brak dostępności niektórych danych oraz dla uproszczenia analizy, pozostawiono domyślne wartości z przykładowego modelu silnika turbowentylatorowego z dopalaczem dostępnego w bibliotece GasTurb.

W przypadku braku głównych parametrów, takich jak podział sprężu między sprężarkami, temperatury za komorą spalania i w dopalaczu, masowego natężenia przepływu przeprowadzono iteracyjną operację uzgadniania modelu z osiągnięciami odniesienia (zgodnij wartość \rightarrow odczytaj ciąg K i jednostkowe zużycie paliwa $c_j \rightarrow$ czy K zgadza się $\pm 1kN$ z deklarowanym ciągiem oraz czy wartość c_j jest wiarygodna? \rightarrow jeśli tak - zakończ, jeśli nie - powtórz z innym parametrem początkowym). W przypadku F135, gdy uzgodnienia wymagało wiele parametrów na raz, wykorzystano narzędzie *Optimize* programu GasTurb z narzuconymi ograniczeniami na ciąg i zużycie paliwa. Zaokrąglone wartości umieszczono w tabeli 1.

Gdy model nie był zgodny dla wartości domyślnych i uzgodnionych parametrów, zmieniono dodatkowo sprawności komponentów, ilości powietrza przeznaczanego na chłodzenie i upusty w podobny sposób aż do uzyskania zadowalającego rezultatu. Zmiany te miały charakter arbitralny, lecz w rozsądnym zakresie, na podstawie zakresów parametrów opisywanych w literaturze.

Dla silnika F135-PW-100 nie ma dostępnych referencji wskazujących na prędkości obrotowe obydwu wałów. Z dużym prawdopodobieństwem, silnik ten jest konstrukcyjnie zbliżony lub jest oparty na podobnych założeniach do dłużej eksploatowanego F100-PW-229 innych z rodziny silników wojskowych firmy Pratt&Whitney. Celem wyznaczenia prędkości obrotowej wału niskiego ciśnienia F135, określono prędkość obwodową łopaty wentylatora PW229 (~ 480 m/s) [F100-PW-229 Product card 2024]. W silniku F135 przyjęto tę samą prędkość i na jej podstawie wyznaczono N_1 dla innej średnicy wentylatora [F135-PW-229 Product card 2024].

Dla wału wysokiego ciśnienia postąpiono podobnie. Wyznaczono z proporcji rysunkowych średnicę na wlocie do sprężarki wysokiego ciśnienia F100-PW-229 i F135-PW-100 [Przekrój silnika F135]. Na jej podstawie wyznaczono prędkość obwodową, itd.

Otrzymane modele, w punkcie pracy, mają różnice do 10% jednostkowego zużycia paliwa względem wartości podawanych przez producenta w broszurach, obecnych w instrukcjach lub innych publikacjach. Należy zaznaczyć, że publikowane wartości nie są opisywane w kontekście warunków lotu, chociaż zwyczajowo jest to dla warunków, dla których wartość c_j jest najniższa. Zadowalającą wartość zgodności ciągu ustalono na $\pm 5\%$ względem deklaracji producentów. Powyższe założenia i zmniejszona liczba zmiennych mają na celu zwiększenie przejrzystości obliczeń i metodologii. Dokładniejsze obliczenia projektowe (z ujęciem sprawności, dokładnych wartości upustów, itd.) nie są przedmiotem obecnych rozważań.

Tabela 1

Parametry silników wykorzystane do wyznaczenia modelu w punkcie pracy

Wielkość	2x RD-33	F100-PW-229	F135-PW-100
Ciąg bez dopalania [kN]	2 x 50,5	79,3	124,3
Jednostkowe zużycie paliwa (brak dopalania) [$g/kN/s$]	21,1	19,89	22,67
Ciąg z dopalaniem [kN]	2 x 81,6	129,3	191,7
Jednostkowe zużycie paliwa (z dopalaniem, 11km) [$g/kN/s$]	54,56	52,42	49,75
Masowe natężenie przepływu [kg/s]	2 x 77	112	147
Stopień podziału mas. nat. przepływu	0,49	0,36	0,57
Spręż wentylatora na średnicy wewnętrznej	2,8	3,8	4
Spręż wentylatora na średnicy zewnętrznej	3,2	4	4,2
Spręż HPC	6,875	8	7
Maks. prędkość obr. wału WC [obr./min]	15539	13450	14170
Maks. prędkość obr. wału NC [obr./min]	11 000	10400	8500
Temp. na wylocie z komory spalania [K]	1530	1675	1980
Temperatura dopalania [K]	2100	2100	2200

Dodatkowe założenia upraszczające przyjęte w modelach:

- atmosfera wzorcowa, sucha
- zarządzanie silnikiem z warunków współpracy komponentów zamiast sterowania FADEC
- brak symulacji zużycia silnika - nowy zespół napędowy

3. PROFILE MISJI

3.1. Profilowanie misji

Na potrzeby obliczeń przygotowano wariant misji - poderwanie awaryjne (*scramble*). Dla prezentowanych samolotów, misja będzie miała stosunkowo inny przebieg ze względu na różne maksymalne osiągi. Profile misji zostały utworzone z wykorzystaniem danych o osiągnięciach poszczególnych samolotów (tabela 2). Część tej tabeli zawiera obliczone wielkości lub otrzymane na podstawie charakterystyk zespołu napędowego (np. v i H przelotowe).

Tabela 2

Parametry literaturowe oraz obliczone analizowanych samolotów bojowych

	MiG-29	F-16C	F-35
Prędkość maksymalna [Ma]	2,3	2,05	1,6
Wysokość maksymalna [m]	18000	15000	15000
Prędkość wznoszenia [m/s]	330 max	250 (330 max)	230 max *oszacowane metodą <i>Specific Excess Power</i>
Zasięg maksymalny (paliwo na pokładzie) [km]	1400	No info	2200
Zasięg bojowy (z uzbrojeniem) [km]	<900	550	1200
Zasięg maksymalny z dodatkowym(i) zbiornikiem	2100	4200	brak podwieszanych zbiorników
Prędkość przelotowa poddźwiękowa [Ma] (11km)	0,95	0,95	0,95
Prędkość przelotowa naddźwiękowa [Ma] (11km)	1,05 (z dopalaniem)	1 (z dopalaniem)	1,2 (<i>super cruise</i> , bez dopalania)

Czas t dla funkcji $H(t)$ oraz $v(t)$ dla poszczególnych statków powietrznych składa się ze stałych czasów kołowania, startu. Czasy wznoszenia zostały wyznaczone z wykorzystaniem maksymalnej prędkości wznoszenia pomnożonej przez współczynnik w zależności od manewru (np. misja 1 – wznoszenie 0,2, misja 2 – podczas pętli w walce 0,6) oraz prędkości EAS równej 300 węzłów. Przyjęto, że etap zniżania zaczyna się na 50 km przed lotniskiem. Zniżanie jednostajne, prędkość zniżania zależna od początkowego pułapu. W końcowym podejściu do lądowania założono prędkość zniżania 10 m/s, lądowanie przy 2 m/s prędkości pionowej. Czasy faz przelotu zostały wyznaczone wykorzystując prędkość i drogę.

3.2. Opis analizowanej misji

Poniżej znajduje się analizowany wariant misji. Opisano przyjęte założenia. Przygotowano profil prędkościowo-wysokościowy przez misję dla każdego z samolotów.

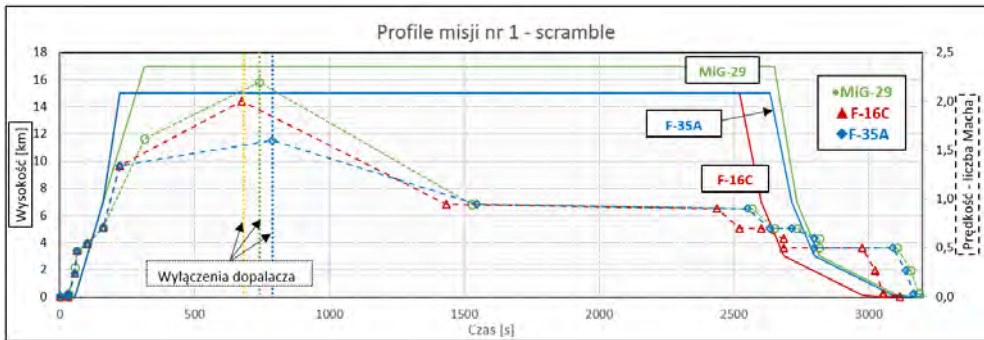
Misja: alarmowe poderwanie samolotów (*scramble*), np. w wyniku naruszenia przestrzeni powietrznej Polski. Misja obejmuje start na pełnym zakresie obrotowym z dopalaniem z 32. Bazy Lotnictwa Taktycznego w Łasku, maksymalną akcelerację i wznoszenie (wysokie zużycie paliwa wymaga lotu na dużej wysokości) oraz przelot jednostajnie przyspieszony aż do maksymalnej prędkości naddźwiękowej. Przyjęto lot w stronę Ukrainy. Po osiągnięciu dystansu około 50 km do granicy – podjęcie trasy

patrolowej wzdłuż granicy z Ukrainą (patrz rys. 2). Powrót zwykłym przelotem niealarmowym.



Rys. 2. Uproszczony schemat toru przelotu (Źródło mapy: OpenStreetMap.org)

Reprezentacja prędkości i wysokości została uproszczona do 20 punktów czasowych – stąd łamany charakter krzywych (rys. 3). Aproksymację liniową uznano za wystarczającą dla obliczeń porównawczych.



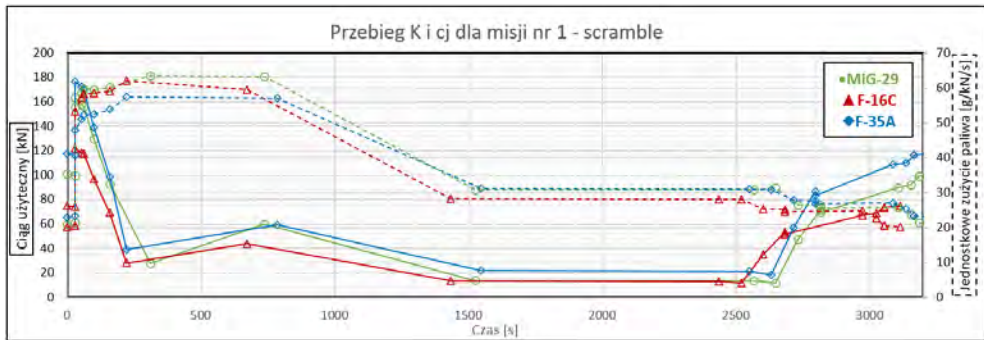
Rys. 3. Profile wysokościowo-prędkościowe samolotów

Dla wszystkich silników przyjęto włączony dopalacz od momentu ustawienia się na pasie startowym aż do osiągnięcia punktu 1, w czasie lotu naddźwiękowego (moment wyłączenia dopalacza zaznaczono pionowymi liniami przerywanymi na rys. 3). Założono także, że samoloty startują z maksymalną masą startową – przed startem są

maksymalnie zatankowane przy zachowaniu podstawowej amunicji do potencjalnego przechwytywania (amunicja do działka i 4 pociski).

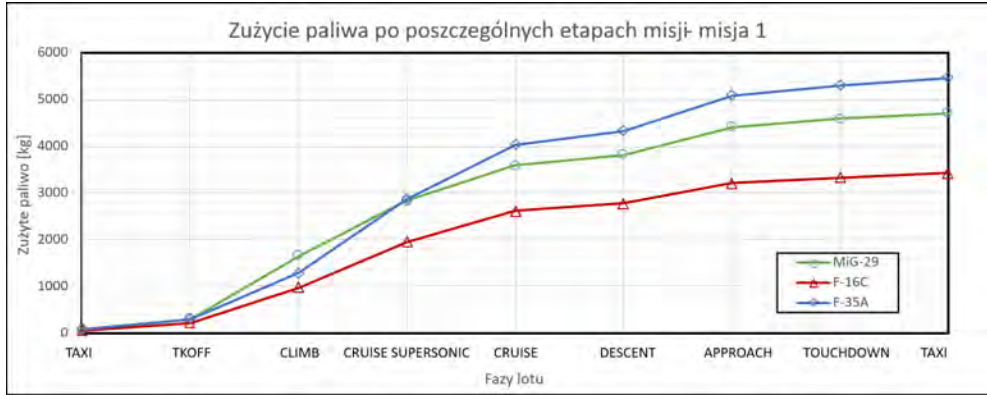
3.2. Wyniki

Poniższa sekcja zawiera wykresy z zależnościami ciągu, jednostkowego zużycia paliwa w funkcji czasu (Rys. 4). Dla poszczególnych faz lotu wyznaczono zużyte paliwo (Rys. 5) oraz sprawność energetyczną (Rys. 6). Pozostałe wielkości porównawcze, takie jak energochłonność, energochłonność zasięgu oraz dla poszczególnych etapów jak i całej misji zamieszczono w tabeli 3. Wykorzystano parametry porównawcze misji opisane w monografii Wygonika [2024]. W przypadku MiG-29, uwzględniono obydwa silniki.



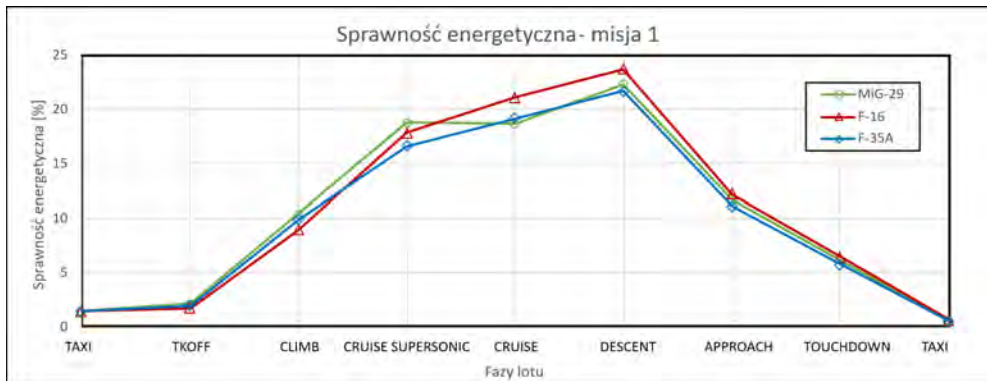
Rys. 4. Przebieg ciągu użytecznego (linia ciągła) i jednostkowego zużycia paliwa (linia przerywana)

Pierwszy wykres pokazuje przebieg ciągu całkowitego oraz jednostkowego zużycia paliwa w czasie dla trzech samolotów (rys. 4). W początkowej fazie widoczny jest gwałtowny wzrost ciągu, odpowiadający pracy silników w warunkach maksymalnego obciążenia i z dopalaniem. Jednocześnie jednostkowe zużycie paliwa jest w tej fazie najwyższe, co jest typowe dla pracy poza optymalnym punktem sprawności. Wraz z wysokością opisywane parametry maleją ze względu na zmniejszone masowe natężenie przepływu na wysokości. Analogicznie w drugą stronę dzieje się podczas zniżania. Wzrost prędkości powoduje zwiększenie zapotrzebowania na ciąg, co widać w okolicach $t = 750$ s. Silnik F-16 wykazuje mniejsze jednostkowe zużycie paliwa w porównaniu do dwóch pozostałych samolotów. Idzie to w parze z niższą wartością ciągu, wskazując na lepszy stosunek ciągu do masy płatowca.



Rys. 5. Zużycie paliwa po poszczególnych etapach misji

Rys. 5 przedstawia skumulowane zużycie paliwa w kolejnych fazach misji. Największe zużycie paliwa osiąga F-35A, potem MiG-29 o 14% mniejsze zużycie i F-16C zużywa aż o 37,5% mniej paliwa. Kluczowe jest to, że największy przyrost zużycia paliwa przypada na moment startu, wznoszenia i przelotu naddźwiękowego. Etapy te dominują bilans paliwowy podczas misji. Różnice w zużyciu paliwa wynikają z kombinacji masy startowej, liczby i charakterystyki silników oraz aerodynamiki. MiG-29 posiada zespół napędowy dwusilnikowy, o gorszej sprawności, co zwiększa zużycie przy dynamicznych fazach lotu. F-35A ze względu na swoją masę (MTOW o 66% większe od MiG-29), pomimo jednego silnika, ma znacznie wyższe zapotrzebowanie na energię, lecz tylko o 16% większe spalanie. Najlepiej wypada F-16C, dzięki relatywnie niskiej masie i układowi napędowemu o wysokiej sprawności.



Rys. 6. Zmiany sprawności energetycznej w poszczególnych etapach misji

Wyliczono sprawność energetyczną silników poszczególnych płatowców w poszczególnych etapach misji. Zmiany tej wielkości przedstawia rys. 6. Sprawność energetyczna opisywana jest zależnością:

$$\eta_{M,n} = \frac{K_n L_n}{W_u m_{pal,n}} \quad (1)$$

gdzie: K_n – ciąg w fazie lotu [kN], L_n – pokonany dystans w fazie lotu [km], W_u – wartość opałowa paliwa [MJ/kg], $m_{pal,n}$ – masa zużytego paliwa w fazie lotu [kg].

Niskie wartości podczas kołowania, startu i podejścia do lądowania spowodowane są niskimi prędkościami i stosunkowo wysokim zużyciem paliwa. Zmniejszona sprawność energetyczna MiG-29 w fazie przelotu zwykłego spowodowana jest lotem na wyższym pułapie – 18 km zamiast 15 km dla F-16 i F-35. Wyższe wartości sprawności na przelocie F-16 i MiG-29 w porównaniu do F-35 spowodowane są wyższymi prędkościami lotu i pokonywaniem większego dystansu. W pozostałych fazach, nieznacznie niższe wartości sprawności F-35 spowodowane są większym zużyciem paliwa, opisanym wcześniej.

Tabela 3

Pozostałe parametry porównawcze opisujące misję

Wielkość	Jednostka	MiG-29	F-16C	F-35A
Zużyte paliwo	kg	4712,6	3420,2	5476,1
Względne zużycie paliwa	-	0,725	0,534	0,662
Procentowy zapas paliwa po zakończeniu lotu	%	27,50	46,56	33,78
Kilometrowe zużycie paliwa	kg/km	5,89	4,28	6,85
Średnie sekundowe zużycie paliwa	kg/s	1,453	1,098	1,697
Czas misji	min	54,07	51,90	53,78
Sprawność energetyczna całej misji	%	13,65	14,23	13,77
Sprawność energetyczna misji z uwzględnieniem masy zespołu napędowego	%	11,15	10,87	11,55

Tabela 3 przedstawia zestawienie parametrów i wyników po całym zadaniu bojowym. Po zakończeniu misji, F-16C zachowuje aż 46,6% paliwa, co jest wartością o około 70% wyższą niż w przypadku MiG-29 (27,5%) i o około 38% wyższą niż w F-35A (33,8%). Oznacza to, że mimo krótszego czasu misji, F-16C dysponuje znacznie większym marginesem operacyjnym, co może przekładać się na większy zasięg alternatywny lub możliwość wydłużenia czasu patrolowania. MiG-29, z najniższym zapasem, jest w tym ujęciu najbardziej energochłonny operacyjnie.

Zużycie paliwa odniesione do przebytego dystansu dodatkowo podkreśla te różnice. F-16C osiąga wartość 4,28 kg/km, podczas gdy MiG-29 zużywa o około 38% więcej (5,89 kg/km), a F-35A aż o około 60% więcej (6,85 kg/km). Wskazuje to na

wyraźnie lepszą efektywność aerodynamiczno-napędową F-16C w całym profilu misji. Podobny obraz daje średnie sekundowe zużycie paliwa: F-35A osiąga najwyższą wartość (1,697 kg/s), o około 17% więcej niż MiG-29 i około 55% więcej niż F-16C. Różnice te są spójne z charakterystyką konstrukcyjną - większa masa i bardziej wymagający profil pracy silnika w F-35A oraz dwusilnikowa konfiguracja MiG-29 przekładają się na wyższe chwilowe zużycie paliwa.

Czasy trwania misji są do siebie zbliżone i różnią się o mniej niż 5%, co oznacza, że obserwowane różnice w zużyciu paliwa nie wynikają z istotnie odmiennego czasu pracy, lecz z rzeczywistej efektywności układu płatowiec-silnik.

Analiza sprawności energetycznej całej misji pokazuje już bardziej subtelne zależności. F-16C osiąga najwyższą sprawność (14,23%), wyprzedzając F-35A (13,77%) i MiG-29 (13,65%), jednak różnice są stosunkowo niewielkie - rzędu kilku procent. Oznacza to, że mimo dużych różnic w zużyciu paliwa, zdolność przekształcania energii chemicznej paliwa w użyteczną pracę napędową jest zbliżona między konstrukcjami. Sytuacja zmienia się po uwzględnieniu masy zespołu napędowego: tutaj najwyższą sprawność osiąga F-35A (11,55%), wyprzedzając MiG-29 (11,15%) i F-16C (10,87%). Może to sugerować, że pojedynczy, nowoczesny silnik F-35A, mimo wysokiego zużycia paliwa, charakteryzuje się korzystnym stosunkiem generowanego ciągu do własnej masy, podczas gdy w F-16C relatywnie lżejszy płatowiec nie kompensuje w pełni tej różnicy na poziomie całego układu napędowego.

4. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki pokazują, że w misjach typu *scramble* efektywność paliwowa jest w dużej mierze zdeterminowana przez charakterystykę pracy w fazie startu i wznoszenia, a nie przez warunki przelotowe. Oznacza to, że wszelkie działania optymalizacyjne - czy to na poziomie sterowania silnikiem, czy planowania profilu lotu - powinny koncentrować się właśnie na tym etapie. Jednocześnie widać wyraźny kompromis konstrukcyjny: platformy projektowane z naciskiem na osiągi i zdolności operacyjne w szerokim spektrum misji, jak F-35A czy MiG-29, ponoszą koszt w postaci większego zużycia paliwa, podczas gdy bardziej „czysta” aerodynamicznie i lżejsza konstrukcja, jak F-16C, oferuje lepszą efektywność w typowym profilu przechwycenia.

Analiza całościowo wskazuje na wyraźny kompromis między osiąganymi a efektywnością. F-16C wyróżnia się jako najbardziej ekonomiczna platforma w analizowanej misji, zarówno pod względem zużycia całkowitego, jak i odniesionego do czasu oraz dystansu. MiG-29 reprezentuje podejście bardziej „siłowe”, z wysokim zużyciem wynikającym z dwusilnikowej konfiguracji i mniejszej efektywności aerodynamicznej. F-35A natomiast, mimo najbardziej zaawansowanej technologii, ponosi koszt w postaci najwyższego zużycia paliwa, co można wiązać z jego masą, charakterystyką *stealth* oraz szerokozakresową optymalizacją silnika, niekoniecznie ukierunkowaną na minimalizację spalania w krótkiej, intensywnej misji przechwytyjącej.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Kurzke J., Halliwell I., 2018, Propulsion and Power: An Exploration of Gas Turbine Performance Modeling, Springer International Publishing AG.
2. Wygonik P., 2024, Dobór zespołu napędowego do samolotu wielozadaniowego według kryterium zadania lotniczego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.

Artykuły w czasopismach

1. Kozakiewicz, A., 2009, Analiza porównawcza osiągnięć turbinowych silników odrzutowych samolotów bojowych obecnie użytkowanych w RP, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 58(2), 65–83.
2. Sabzehali M., Rabiee A., Alibeigi M., Mosavi A., 2022, Predicting the energy and exergy performance of F135 PW100 turbofan engine via deep learning approach, Energy Conversion and Management, nr 265

Komunikaty Internetowe

1. F100-PW-229 Product card, <https://prd-sc102-cdn.rtx.com/-/media/pw/newsroom/collateral/documents/military-engines/f100-pw-229-product-card.pdf> (dostęp 22.03.2026).
2. F135-PW-229 Product card, <https://prd-sc102-cdn.rtx.com/prattwhitney/-/media/pw/newsroom/collateral/documents/military-engines/f135-ctol.pdf> (dostęp 22.03.2026)
3. Przekrój silnika F135, <https://prd-sc102-cdn.rtx.com/prattwhitney/-/media/pw/newsroom/multimedia/f135-engine/images/f135-ctol.jpg> (dostęp 22.03.2026)

ACKNOWLEDGEMENTS

Author declares no conflict of interest.

MISSION BASED PERFORMANCE ASSESSMENT AND COMPARISON OF MODERN MILITARY FIGHTER JET ENGINES IN SERVICE IN POLISH AIR FORCE

Abstract

This paper presents a methodology for evaluating the performance of gas turbine engines in the context of combat mission execution. The analysis focuses on propulsion systems used in MiG-29, F-16 Fighting Falcon, and F-35 Lightning II aircraft. The research procedure includes the determination of the engine design point, development of off-design models, and implementation of a representative scramble type mission profile. For each case, time-dependent performance calculations were carried out, accounting for varying flight conditions. Based on these results, synthetic parameters describing engine performance over the entire mission cycle were derived. The conducted analysis enables a comparative assessment of the considered engine architectures in an operational context. It is shown that differences in engine design significantly influence operational characteristics.

Keywords: fighter jet, mixed turbofan engine, mission profile, performance comparison

Robert KŁOSOWIAK*

OGNIWA PALIWOWE TYPU DIRECT CARBON FUEL CELL W SYSTEMACH BEZPIECZEŃSTWA PAŃSTWA: ANALIZA KONFIGURACJI, MATERIAŁÓW I OGRANICZEŃ WDROŻENIOWYCH

Ogniwa paliwowe typu direct carbon fuel cell (DCFC) należą do grupy wysokotemperaturowych źródeł energii, w których stały węgiel jest utleniany elektrochemicznie bez etapu klasycznego spalania. Celem artykułu jest uporządkowanie stanu wiedzy dotyczącego odmian DCFC, materiałów elektrolitów i elektrod oraz wskazanie konfiguracji, która może być realnie rozwijana w skali laboratoryjnej i przedwdrożeniowej na potrzeby systemów bezpieczeństwa państwa. Przeanalizowano warianty z elektrolitem stałotlenkowym, węglanowym i hybrydowym, ze szczególnym uwzględnieniem roli membrany YSZ, warstw porowatych nasączonych węglanem oraz zjawiska triple phase boundary. Zaproponowano architekturę hybrydowego ogniwa z beztlenowym podawaniem paliwa, kontrolowanym dopływem tlenu wyłącznie do katody oraz lokalnym zwilżaniem strefy anodowej węglanem sodu. Wykazano, że DCFC może stanowić interesujące źródło zasilania stacjonarnego dla infrastruktury krytycznej, jednak rozwój technologii ograniczają: wysoka temperatura pracy, korozja materiałowa, utrata elektrolitu, skomplikowane uszczelnienia oraz niski poziom dojrzałości wdrożeniowej.

Słowa kluczowe: direct carbon fuel cell, YSZ, carbon footprint, bezpieczeństwo energetyczne

* Politechnika Poznańska, Instytut Energetyki Ciepłej.

1. WPROWADZENIE

Rosnące znaczenie odporności energetycznej państwa powoduje, że obok technologii wodorowych i magazynowania energii coraz częściej analizowane są także wysokosprawne źródła stacjonarne wykorzystujące paliwa stałe. Do tej grupy zalicza się ogniwa direct carbon fuel cell, w których energia chemiczna węgla jest przekształcana bezpośrednio w energię elektryczną w procesie elektrochemicznym [Giddey et al. 2012].

W przeciwieństwie do klasycznych bloków węglowych, DCFC nie wymaga sekwencji przemian: spalanie - para - turbina - generator, lecz realizuje pojedynczy etap konwersji, co teoretycznie pozwala osiągnąć bardzo wysoką sprawność elektrochemiczną [Coal Innovation NSW 2021].

Całkowita reakcja w DCFC to:

- Anoda: $C + 2 CO_3^{2-} \rightarrow 3 CO_2 + 4 e^-$
- Katoda: $O_2 + 2 CO_2 + 4 e^- \rightarrow 2 CO_3^{2-}$

Powyższe pokazuje, że anoda generuje elektrony utleniając węgiel do CO_2 (przy udziale jonów karbonatowych CO_3^{2-} z elektrolitu), zaś na katodzie utleniacz (tlen) zredukowany jest do jonów O^{2-} , które w obecności CO_2 tworzą jony CO_3^{2-} wracające do elektrolitu. Technologia DCFC nie jest technologią zeroemisyjną. Jej przewagą jest jednak możliwość uzyskania strumienia anodowego o wysokim udziale CO_2 , co upraszcza potencjalny wychwyty i zagospodarowanie tego gazu w porównaniu z rozcieńczonymi spalinami klasycznego kotła [Giddey et al. 2012]. W dodatkowym ujęciu systemowym na korzyść DCFC przemawia możliwość wykorzystania nie tylko koksu i węgla kamiennego, lecz również biowęgla, karbonizowanych odpadów organicznych czy wysokowęglowych produktów ubocznych procesów przemysłowych [Yu et al. 2021].

Celem artykułu jest przedstawienie krytycznej analizy rodzajów DCFC, omówienie materiałów i mechanizmów odpowiedzialnych za wydzielanie energii elektrycznej oraz wskazanie konfiguracji, która może być rozwijana jako moduł laboratoryjno-przemysłowy dla zasilania stacjonarnego obiektów istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa państwa. Szczególną uwagę poświęcono problemom praktycznym: sposobowi doprowadzania węgla bez obecności tlenu, tworzeniu aktywnej granicy trójfazowej, doborowi membrany oraz degradacji materiałowej w kontakcie z gorącymi węglanami.

2. OGNIWA

2.1. Reakcje elektrochemiczne i sprawność

W podstawowej interpretacji reakcja całkowita w DCFC odpowiada utlenieniu węgla do dwutlenku węgla. W wariacie z elektrolitem stałotlenkowym po stronie katody zachodzi redukcja tlenu do jonów tlenkowych O^{2-} , a po stronie anody ich zużycie podczas utleniania węgla. W wariantach węglanowych nośnikiem ładunku mogą być także jony CO_3^{2-} [Giddey et al. 2012, Cui et al. 2021]. Oznacza to, że do paliwa nie są transportowane atomy tlenu w sensie gazowym, lecz jony przemieszczające się przez fazę elektrolitu.

Teoretyczną granicę sprawności elektrycznej ogniwa można zapisać zależnością [Coal Innovation NSW 2021]:

$$\eta_{\max} = \Delta G / \Delta H \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

η_{\max} - maksymalna sprawność elektryczna ogniwa,

ΔG - zmiana energii swobodnej Gibbsa reakcji całkowitej,

ΔH - entalpia reakcji.

Wysoka wartość ilorazu $\Delta G/\Delta H$ stanowi główną przewagę DCFC nad konwersją termiczną, choć rzeczywista sprawność układu jest obniżana przez polaryzację elektrod, opór omowy, straty ciepłone i reakcje uboczne, w szczególności reakcję Bou-douarda [Giddey et al. 2012, Yu et al. 2021].

2.2. Główne odmiany ogniw DCFC

W piśmiennictwie wyróżnia się trzy podstawowe rodziny DCFC: układy stałotlenkowe (SO-DCFC), układy ze stopionymi węglanami (MC-DCFC) oraz układy hybrydowe łączące membranę ceramiczną z lokalną obecnością węglanu po stronie anody [Cui et al. 2021, Ozalp et al. 2022]. Z punktu widzenia projektowania modułu dla zastosowań bezpieczeństwa najistotniejsze cechy tych wariantów zestawiono w tab. 1.

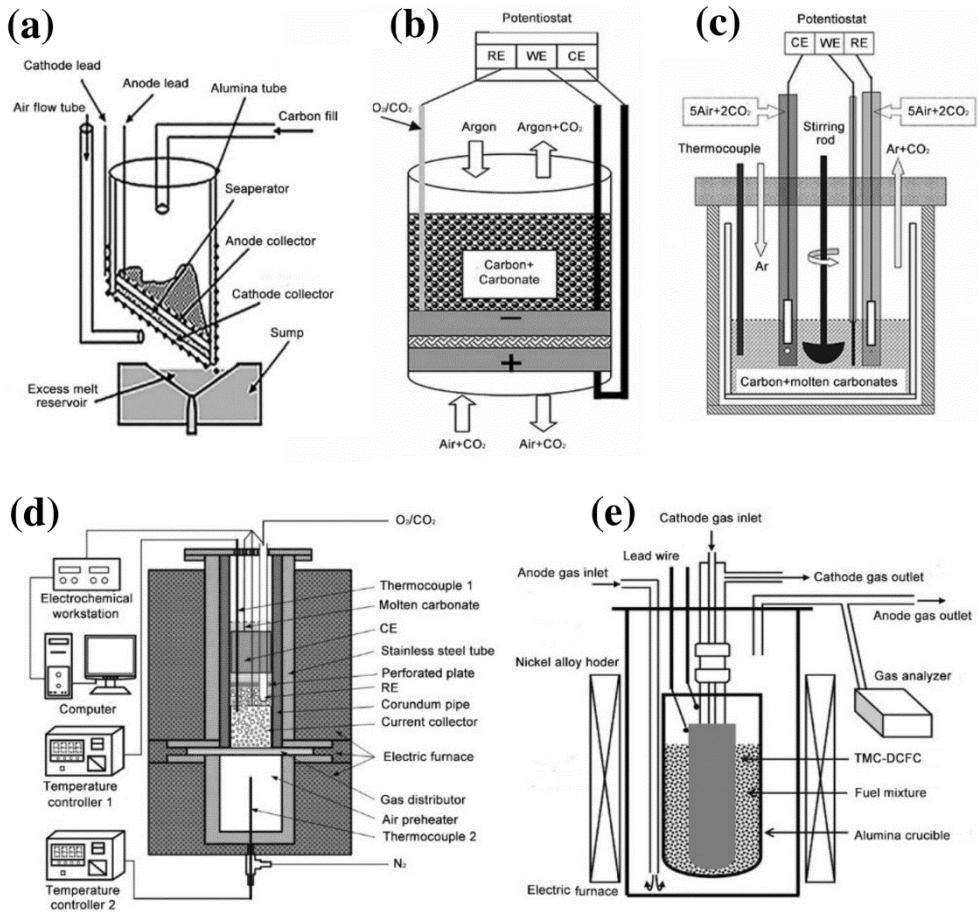
Największe znaczenie aplikacyjne mają obecnie układy hybrydowe. Z jednej strony korzystają one z gazoszczelności i selektywnego transportu O^{2-} przez membranę YSZ, z drugiej - wykorzystują dodatni wpływ węglanów na zwilżanie paliwa oraz rozszerzenie granicy triple phase boundary [Cui et al. 2021, Yu et al. 2021]. W literaturze opisano również warianty z ciekłym metalem w komorze anodowej, jednak pozostają one rozwiązaniem bardziej niszowym i trudniejszym technologicznie [Antolini 2023].

Tabela 1

Porównanie głównych wariantów ogniw DCFC

Wariant	Nośnik jonów	Zakres T [°C]	Zalety	Główne ograniczenia
SO-DCFC	O^{2-}	700-1000	pełna separacja gazów, brak swobodnej kąpeli solnej	trudne tworzenie TPB, wymagające uszczelnienia ceramiczne
MC-DCFC	CO_3^{2-}	650-900	szybka kinetyka utleniania węgla, łatwiejszy kontakt paliwa z elektrolitem	korozja stopionych soli, utrata elektrolitu, ryzyko zalania katody
HDCFC	O^{2-} + lokalnie CO_3^{2-}	750-900	połączenie separacji gazów z poprawą TPB	złożoność konstrukcji, wrażliwość na degradację międzywarstw

Rozwój DCFC zaowocował kilkoma koncepcjami konstrukcyjnymi, różniącymi się układem elektrod i sposobem kontaktu paliwa z elektrolitem. Rysunek 1 ilustruje kilka takich rozwiązań, omówionych poniżej[Cui et al. 2021].



Rys. 1. Przykładowe konfiguracje ogniw DCFC z elektrolitem węglanowym: a) Nachylone ogniwo MC-DCFC – katoda (NiO) u góry, anoda w postaci warstwy ciekłego elektrolitu z węglem na pochyłym dnie; nadmiar elektrolitu spływa do zbiornika, co zapobiega zalewaniu katody. b) Planarne ogniwo MC-DCFC – warstwa pasty węgiel+węglan leży bezpośrednio na poziomej anodzie metalicznej, powyżej znajduje się katoda; układ zapewnia niski opór wewnętrzny dzięki dobrej styczności warstw. c) Ogniwo ze mieszadłem – pionowy reaktor, w którym obracający się pręt utrzymuje jednorodną suspensję węgla w stopionym węglanie, poprawiając transport masy i ciepła. d) Ogniwo fluidyzacyjne (FBEDCFC) – gaz (np. CO₂) bąblujący od dołu miesza węgiel z elektrolitem, tworząc złożę fluidalne i zwiększając powierzchnię reakcji. e) Tubularne ogniwo TMC-DCFC – konstrukcja z zamkniętą końcówką; w środku pionowej rurki (anoda) doprowadzany jest węgiel stały, a na zewnątrz rury (katoda) dopływa utleniacz. Taka geometria eliminuje zwarcia między elektrodami przez fizyczne odseparowanie paliwa, a jednocześnie umożliwia ciągle zasilanie węgla przez wsypywanie go do rurki anody.

3. MATERIAŁY I ARCHITEKTURY OGNIW DCFC

3.1. Elektrolity, membrany i nośniki porowate

W układach SO-DCFC i HDCFC materiałem odniesienia dla membrany pozostaje YSZ, czyli cyrkonia stabilizowana itrem. Materiał ten zapewnia przewodniczość jonów tlenkowych, szczelność gazową oraz wysoką stabilność temperaturową, dlatego stanowi podstawowy elektrolit także w klasycznych SOFC [Yu et al. 2021]. W praktyce nie należy utożsamiać go z minerałem cyrkonem; funkcję elektrolitu pełni dopiero odpowiednio spieczony i stabilizowany tlenek cyrkonu.

W systemach węglanowych i w warstwach przejściowych HDCFC stosuje się stopione węglany alkaliczne. Ich rola nie ogranicza się do transportu ładunku. Jak wskazują przeglądy i badania eksperymentalne, obecność węglanu w komorze anodowej poprawia zwilżanie cząstek paliwa, zwiększa długość aktywnej granicy triple phase boundary i może katalizować utlenianie węgla [Cui et al. 2021]. Z tego względu dodatek Na_2CO_3 do paliwa lub nasycenie porowatej przekładki węglanem może być celowym zabiegiem konstrukcyjnym, o ile nie doprowadza do zalania całej anody.

W MCFC standardowym nośnikiem ciekłego elektrolitu pozostaje porowaty LiAlO_2 . Według aktualnych przeglądów materiał ten łączy zdolność utrzymywania węglanu z odpowiednią powierzchnią właściwą, ale jest jednocześnie jednym z najbardziej krytycznych komponentów pod kątem stabilności strukturalnej i starzenia [Sheikh et al. 2024]. W warunkach DCFC rolę podobnych przekładek mogą pełnić również Al_2O_3 , ZrO_2 lub inne porowate ceramiki obojętne chemicznie względem węglanów.

3.2. Elektrody, kolektory i znaczenie

Mechanizm wydzielania energii elektrycznej w DCFC wymaga jednoczesnego kontaktu przewodnika jonowego, przewodnika elektronowego i paliwa. Oznacza to, że sama obecność węgla w komorze anodowej nie wystarcza; konieczne jest utworzenie licznych lokalnych stref TPB, w których jon dostarczony przez elektrolit dociera do węgla, a uwolniony elektron może zostać odebrany przez przewodnik metaliczny lub kompozytowy [Cui et al. 2021].

W praktyce rolę kolektorów prądowych mogą pełnić siatki, pianki lub warstwy porowate wykonane ze srebra, niklu bądź stopów wysokoniklowych. Srebro wykazuje korzystną odporność chemiczną w środowisku węglanowym, ale przy temperaturach zbliżonych do $900\text{ }^\circ\text{C}$ jest materiałem miękkim, podatnym na pęcznienie, dlatego powinno pracować jako lekka siatka kolektorowa, a nie element konstrukcyjny [Coal Innovation NSW 2021]. W obecności siarki lub chloru pochodzących z paliwa bezpieczniej rozważać kolektory niklowe lub Inconel.

Badania projektów hybrydowych wykazały, że osiągi ogniwa silnie zależą od mikrostruktury anody, powierzchni kontaktu z kolektorem oraz zdolności warstwy paliwowej do utrzymywania ciągłej, ale nie nadmiernej fazy węglanowej [Yu et al. 2021]. Oznacza to, że poprawa parametrów nie wynika wyłącznie z doboru składu chemicznego, ale także z architektury porów, siły docisku oraz sposobu podawania paliwa.

3.3. Degradacja materiałowa

Wysokotemperaturowa praca DCFC prowadzi do zjawisk określanych jako korozja termiczna. W przypadku metali obejmuje ona utlenianie, sulfidację i przyspieszone niszczenie warstw ochronnych przez stopione sole. W przypadku ceramiki, w tym YSZ, problemem staje się długotrwały kontakt z węglanami alkalicznymi, penetracja granic ziaren oraz lokalna utrata własności mechanicznych [Cui et al. 2021, Antolini 2023].

Dodatkowe trudności wynikają z zanieczyszczeń paliwa. Popiół, siarka, chlor i związki mineralne mogą reagować z kąpielą węglanową, prowadząc do powstawania osadów i zmian lepkości. W układach ze stopionym elektrolitem oznacza to potrzebę okresowej regeneracji lub wymiany części kąpeli, a w wariantach hybrydowych - stosowania jedynie cienkiej, lokalnej warstwy węglanu oraz szczelnej separacji gazów [Sheikh et al. 2024, Kouchachvili, Geddis i Zhuang 2021].

4. KONCEPCJA OGNIWA LABORATORYJNO-WDROŻENIOWEGO

Na podstawie przeprowadzonej analizy za najbardziej racjonalny kierunek rozwoju należy uznać hybrydowe ogniwo HDCFC, w którym gęsta membrana YSZ oddziela komorę katodową od komory anodowej, natomiast po stronie anody występuje jedynie cienka warstwa lub strefa porowata nasączona Na_2CO_3 . Taki układ umożliwia doprowadzanie tlenu wyłącznie do katody, a więc eliminuje ryzyko bezpośredniego spalania paliwa w komorze anodowej.

Proponowana architektura składa się z następujących elementów: gęstej membrany YSZ, cienkiej warstwy buforowej Al_2O_3 lub spinelu chroniącej ceramikę przed długotrwałym kontaktem z węglanem, porowatej przekładki $\text{LiAlO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ utrzymującej lokalną fazę ciekłego węglanu, siatki kolektorowej Ag lekko dociśniętej do wilgotnej strefy anodowej, warstwy paliwowej z drobnoziarnistego węgla oraz katody typu LSM/YSZ lub LSCF [Cui et al. 2021, Sheikh et al. 2024].

Rozdrobniony węgiel powinien być podawany do anody wyłącznie przez układ śluzu lub podajnik ślimakowy pracujący w atmosferze CO_2 albo N_2 . Nad komorą anodową należy utrzymywać lekkie nadciśnienie gazu obojętnego, tak aby wyklu-

czyć zasysanie powietrza. Węgiel nie może być wprowadzany do układu w kontakcie z tlenem, ponieważ prowadziłoby to do klasycznego spalania, a nie do kontrolowanej reakcji elektrochemicznej. Dopływ tlenu ma być realizowany tylko po stronie katody, skąd jony O^{2-} transportowane są przez YSZ do miejsc aktywnych na anodzie.

W celu utworzenia wydajnej TPB proponuje się dwa współpracujące zabiegi: po pierwsze, lokalne zwilżenie strefy anody stopionym Na_2CO_3 ; po drugie, częściowe wymieszanie drobnego paliwa z ograniczoną ilością węgla przy samej membranie. Nadmierna ilość węgla jest niekorzystna, ponieważ grozi zalaniem porów i utratą dyfuzji gazowej. Dlatego strefa 'mokra' powinna być cienka i utrzymywana kapilarnie przez nośnik porowaty, podczas gdy dalsza część złoża może pozostać względnie sucha.

Po stronie anodowej produktami procesu są przede wszystkim CO_2 , część CO oraz pozostałości mineralne i osady pochodzące z popiołu. Z tego względu komora anody powinna być wyposażona w system okresowego usuwania szlamu oraz w możliwość częściowej wymiany i oczyszczania fazy węglanowej. Badania ciągłej pracy wskazują, że zasilanie paliwem i recyrkulacja elektrolitu są technicznie możliwe, ale właśnie utrata elektrolitu i degradacja materiałowa pozostają jednymi z głównych przyczyn spadku osiągnięć [Kouchachvili, Geddis i Zhuang 2021].

5. ZNACZENIE TECHNOLOGII DCFC DLA SYSTEMÓW BEZPIECZEŃSTWA PAŃSTWA

Z perspektywy bezpieczeństwa państwa DCFC należy rozpatrywać przede wszystkim jako źródło stacjonarne, a nie mobilne. Wysoka temperatura pracy, czas rozruchu oraz wymagania materiałowe wykluczają obecnie użycie tej technologii jako szybkiego źródła polowego. Jednocześnie parametry te nie dyskwalifikują zastosowań w infrastrukturze krytycznej, obiektach o znaczeniu obronnym, odizolowanych punktach logistycznych oraz w układach mikrosieci wymagających wielogodzinnej lub wielodobowej pracy bazowej.

Do kluczowych przewag DCFC w tym obszarze należą: możliwość wykorzystania paliw stałych łatwych do magazynowania, brak potrzeby transportu i kompresji wodoru, relatywnie wysoka sprawność elektryczna oraz możliwość uzyskania skoncentrowanego strumienia CO_2 do dalszej obróbki. W warunkach krajowych dodatkowe znaczenie ma możliwość wykorzystania krajowych surowców węglowych lub karbonizowanych paliw wtórnych, co może wzmacniać odporność logistyczną w sytuacjach kryzysowych.

Jednocześnie należy wyraźnie wskazać ograniczenia. Po pierwsze, poziom gotowości technologicznej DCFC pozostaje niski; raport z demonstratora 1 kW dowodzi wykonalności, ale nie rozstrzyga jeszcze kwestii długotrwałej pracy i ekonomiki systemu [Coal Innovation NSW 2021]. Po drugie, technologia nie spełnia kryterium

zeroemisyjności. Jej potencjał dla 'czystej energii' wynika raczej z wysokiej sprawności, łatwiejszego wychwytu CO₂ oraz możliwości sprzężenia z paliwami biogenicznymi niż z eliminacji emisji.

Z punktu widzenia obronności najrozsądniejszy scenariusz rozwojowy obejmuje więc zastosowania niszowe: długotrwałe źródła bazowe dla obiektów wymagających autonomii, systemy odzysku energii z karbonizowanych odpadów oraz moduły badawczo-doświadczalne rozwijające kompetencje materiałowe i systemowe krajowego przemysłu.

6. WNIOSKI

Analiza literatury wskazuje, że DCFC jest technologią o wysokim potencjale sprawnościowym, lecz nadal na etapie intensywnego rozwoju materiałowego i konstrukcyjnego. Najbardziej obiecującym rozwiązaniem dla dalszych badań jest konfiguracja hybrydowa wykorzystująca membranę YSZ, lokalną obecność Na₂CO₃ po stronie anody oraz porowaty nośnik tworzący kontrolowaną strefę TPB.

Z praktycznego punktu widzenia kluczowe pozostają: beztlenowe podawanie węgla, dobór kolektora odpornego na wysoką temperaturę i zanieczyszczenia paliwa, ochrona membrany przed długotrwałym kontaktem z gorącym węglanem oraz możliwość usuwania produktów ubocznych z komory anody. Bez rozwiązania tych problemów trudno będzie przejść od demonstratorów laboratoryjnych do systemów pracujących długotrwałe.

Technologia DCFC może mieć znaczenie dla systemów bezpieczeństwa państwa jako wysokosprawne źródło stacjonarne, szczególnie tam, gdzie liczy się odporność paliwowa i ciągłość zasilania. W krótkiej i średniej perspektywie priorytetem powinny być badania nad trwałością, uszczelnieniami, korozją oraz architekturą zasilania paliwem, a nie próby szybkiej komercjalizacji w zastosowaniach mobilnych.

LITERATURA

1. Antolini E., 2023, Liquid Metal Anode and Hybrid Direct Carbon Fuel Cells, Catalysts, 13(7), 1107.
2. Coal Innovation NSW, 2021, Development of a 1 kW Modular Direct Carbon Fuel Cell Demonstration Plant UoN Donne DCFC - with appendices, Final Report, Newcastle.
3. Cui C., Li S., Gong J., Ma J., 2021, Review of molten carbonate-based direct carbon fuel cells, Materials for Renewable and Sustainable Energy, 10, art. 12.
4. Giddey S., Badwal S.P.S., Kulkarni A., Munnings C., 2012, A comprehensive review of direct carbon fuel cell technology, Progress in Energy and Combustion Science, 38(3), s. 360-399.

5. Kouchachvili L., Geddis P., Zhuang Q., 2021, Direct carbon fuel cell design for continuous operation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(9), s. 6792-6802.
6. Ozalp N., Nam H., Dorris A., 2022, An overview of direct carbon fuel cells and their promising applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112458.
7. Sheikh A.A., Bianchi F.R., Bove D., Bosio B., 2024, A review on MCFC matrix: State-of-the-art, degradation mechanisms and technological improvements, *Heliyon*, 10(4), e25847.
8. Yu F., Han T., Wang Z., Xie Y., Wu Y., Jin Y., Yang N., Xiao J., Kawi S., 2021, Recent progress in direct carbon solid oxide fuel cell: Advanced anode catalysts, diversified carbon fuels, and heat management, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, s. 4283-4300.

DIRECT CARBON FUEL CELLS IN STATE SECURITY SYSTEMS: ANALYSIS OF CONFIGURATIONS, MATERIALS AND DEPLOYMENT LIMITATIONS

Abstract

The paper discusses direct carbon fuel cells (DCFCs) as a high-temperature electrochemical technology for converting the chemical energy of solid carbon directly into electricity. The study systematizes the main DCFC families, including solid oxide, molten carbonate and hybrid configurations, and evaluates their relevance for stationary applications related to state security and critical infrastructure protection. Particular attention is given to YSZ membranes, porous carbonate-bearing interlayers, current collectors and the role of the triple phase boundary. Based on the reviewed literature, a hybrid architecture is proposed in which carbon is supplied to the anode under an oxygen-free atmosphere, while oxygen is delivered only to the cathode and transported toward the fuel as oxide ions through the ceramic electrolyte. The paper shows that DCFC may become a promising option for resilient stationary power generation, but its deployment is still constrained by high operating temperatures, material corrosion, electrolyte loss, sealing complexity and limited technological maturity.

Keywords: direct carbon fuel cell, YSZ, sodium carbonate, energy resilience.

Zdzisław KOBOS*

PSYCHOLOGICZNE ASPEKTY SOLASTALGII A EKSPLOATACJA ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO I KONSEKWENCJE DLA CZŁOWIEKA

Współczesne szanse, ograniczenia i perspektywy pozyskiwania oraz wykorzystania „czystej energii w systemach bezpieczeństwa państwa” wymagają holistycznej analizy ze względu na multidyscyplinarność problematyki, której specyfika jest obszarem zainteresowań wielu dyscyplin naukowych. Szczegółowe dziedziny wiedzy, ze swoim dorobkiem naukowym, aparatem badawczym, pozwalają poszukiwać nowych źródeł energii, ale równocześnie ocenić uwarunkowania i koszty psychologiczne efektywności działania człowieka w aktualnie bardzo złożonym środowisku społecznym i technicznym. Próby rozwiązywania wielu problemów jakim jest pozyskiwanie m.in. czystej energii, wymagają, określenia roli *spiritus movens* z: antropologicznego, technicznego i psychologicznego punktu widzenia.

Słowa kluczowe: czynnik ludzki, stres ekologiczny, czysta energia, stolastalgia

1. WPROWADZENIE

Obecnie bardzo dynamiczny rozwój ludzkości, poprzez postęp techniczny generuje wiele nowych potrzeb współczesnych społeczeństw, które mogą być zaspokojone dzięki dostarczeniu czystej energii, która zapewni nie tylko komfort funkcjonowania osobistego, ale też również w szerszej perspektywie, bezpieczeństwo energetyczne państwa. Zatem, prowadząc rozważania dotyczące wspomnianej problematyki, należy mieć też na względzie wielorakie uwarunkowania takich działań. Mianowicie: z jednej strony ważne są potrzeby cywilizacyjne ludzkości oraz aktualne i potencjalne możliwości rozwiązań technicznych, czynniki ekonomiczne tych conceptów, zaś z drugiej strony dostępne lokalne zasoby planety, zaś z trzeciej strony istotne są skutki eksploatacji przyrody i ich wpływ na samopoczucie i zdrowie społeczeństw.

*Rejonowa Wojskowa Komisja Lotniczo-Lekarska w Warszawie, Warszawska Uczelnia Biznesu i Psychologii „Moderna”.

W niniejszej pracy wskazano również na rolę tzw. czynnika ludzkiego w kreowaniu rozwiązań związanych z efektywnym generowaniem czystej energii oraz rolę solastologii[†] we współczesnych społeczeństwach, która wskazuje na relacje społeczne, stan psychiczny i fizyczny spowodowany zmianami środowiska przyrodniczego.

Analizując ewolucję tych procesów z punktu antropologii i historii rozwoju ludzkości można skonstatować, że człowiek od zarania dziejów był zależny od środowiska przyrodniczego, które zabezpieczało jego potrzeby pokarmowe i pozwalało mu istnieć. Początkowo zapewne egzystencja fizyczna i poziom życia zależały m.in. do lokalnych zasobów przyrodniczych, które: zabezpieczały podstawowe potrzeby bytowe, dostarczały materiałów do budowy miejsc do schronienia się przed środowiskiem fizycznym, społecznym, warunkami klimatycznymi. Ponadto, schronienia naturalne czy zbudowane według jego pomysłów, pozwalały mu na gromadzenie niezbędnych zasobów do codziennej egzystencji czy gromadzenia zapasów na dalsze dni życia. Z czasem wytworzyły się grupy plemienne jako przedpaństwowe formy organizacji społecznej, oparte na wspólnym terytorium, pokrewieństwie, formach wokalnych przy pomocy których się komunikowano, a które również eksploatowały lokalną przyrodę. Stopniowo te plemiona stworzyły hierarchię rodową zarządzaną przez starszyznę lub/i wodza, a osoby te pełniły funkcje gospodarcze i obronne. Ich egzystencja zależała od łowictwa, myślistwa, hodowli, rolnictwa i rzemiosła. Dalszy rozwój cywilizacyjny spowodował, że z czasem wykształciła się bardziej sformalizowana władza (panowie, książęta, kłólowie), powstawały nowe formy gospodarcze, jak pracownie rękodzielnicze, zakłady rzemieślnicze, a etapami również fabryki, które coraz bardziej absorbowały zasoby naturalne i eksploatowały surowce i inne rezerwuary przyrody. Postępujący rozwój techniczny i rewolucja przemysłowa, zmieniły relacje społeczne, zdezonizowały klasycznego rzemieślnika, wytwarzającego dobra materialne i eksploatującego przyrodę, a wytworzyły nową klasę społeczną, czyli robotnika i inżyniera. Ten postęp cywilizacyjny, przyczynił się do masowej produkcji wielu dóbr, ale też zmienił rolę człowieka w tym systemie społecznym, który był coraz bardziej uprzedmiotowiony w relacjach układu funkcjonalnego:

człowiek – maszyna (technika) – środowisko.

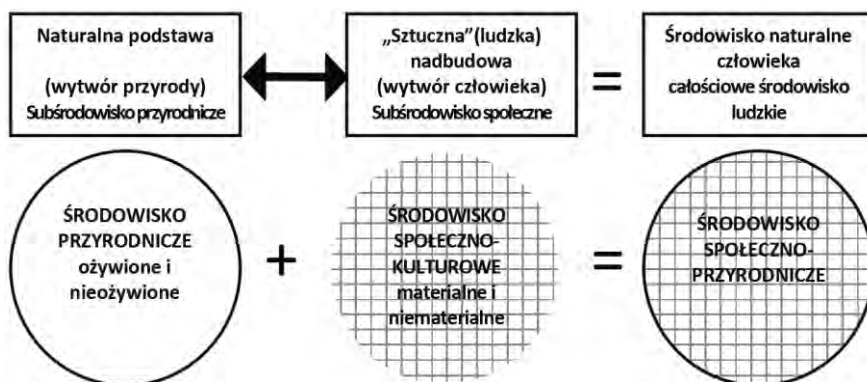
[†] Solastalgia, to forma lęku, stresu emocjonalnego, spowodowana zmianami środowiskowymi w otoczeniu przyrodniczym (niszczenie środowiska). Degradacji krajobrazu, która wynika z działalności człowieka powodując negatywne stany emocjonalne. Solastalgia staje się coraz powszechniejszym problemem zdrowia psychicznego w dobie antropocenu, dotykając ludzi obserwujących szybką degradację ich lokalnych ekosystemów, <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pan3.70090>

Termin ten, zaproponowany w 2010 roku przez australijskiego filozofa Glenna Albrechta, opisuje stres spowodowany zmianami środowiska naturalnego, nieznaną pocieszenia, wywołujący nostalgę.

Rozwój cywilizacji i nowe technologie, powodują, że współczesne środowisko przyrodnicze i relacje społeczne podlega ciągłym przeobrażeniom. Praca ludzka była zawsze powiązana z czerpaniem korzyści, eksploataowaniem i podporządkowaniem sobie przyrody, ale również należy zwrócić uwagę, że ta wspomniana relacja wpływa na koszty psychologiczne[‡], stan psychofizyczny człowieka, oraz jego samopoczucie.

2. UDZIAŁ CZYNNIKA LUDZKIEGO W KOEGZYSTENCJI Z PRZYRODĄ

Analizując zachowanie współczesnych społeczeństw w relacji do środowiska można zauważyć, że następuje coraz bliższa współpraca nauk technicznych, przyrodniczych, a także społecznych (psychologii, psychiatrii, socjologii, antropologii kulturowej) w zakresie nie tylko eksploatacji i ochrony przyrody. To współdziałanie dotyczy również oceny wpływu tej eksploatacji na kondycję, stan zdrowia fizycznego i psychicznego człowieka. Różnorakie uwarunkowania i zależności funkcjonowania człowieka w środowisku społeczno-kulturowo-przyrodniczym obrazuje rys. 1.



Rys. 1. Środowisko społeczno przyrodniczo-kulturowe człowieka

Źródło: Ciszek Mariusz, Środowisko człowieka i jego bezpieczeństwo. Zarys koncepcji bezpieczeństwa środowiskowego (ekologiczno-zdrowotnego) (w kręgu interdyscyplinarnej filozofii postrzegania środowiska), Humanum- Międzynarodowe Studia Społeczno-Humanistyczne, 32 (1) 2019, 1-6

Należy zauważyć, że o stanie środowiska przyrodniczego, jego wieloaspektowych przekształceń oraz wykorzystaniu go do swoich potrzeb, decyduje co prawda

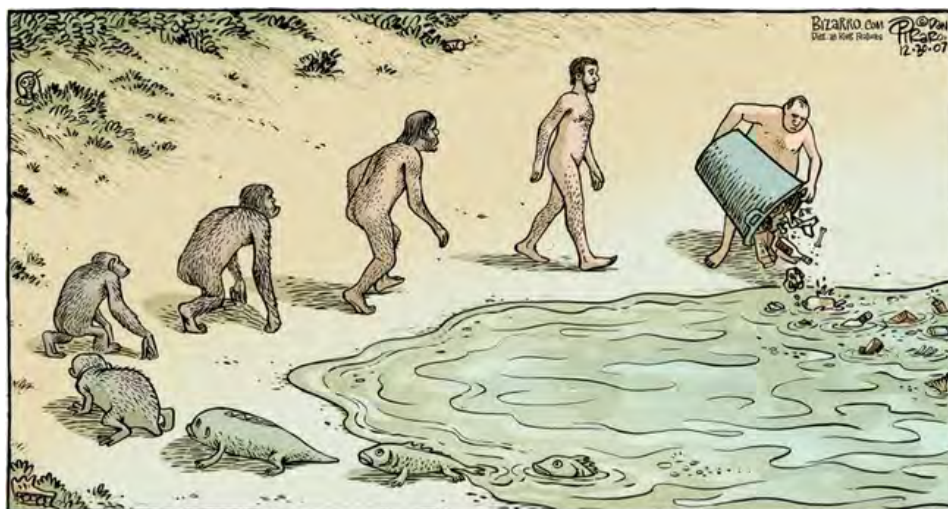
[‡] Sa to najczęściej: subiektywne poczucie dyskomfortu, przygnębienie, emocjonalne obciążenia, frustracja, stres, a niekiedy lęk oraz spadek energii do działania.

człowiek, ale również niekiedy to środowisko w krótszej lub dłuższej perspektywie czasowej, wpływa na jego sytuację zdrowotną, samopoczucie oraz ogólną kondycję psychofizyczną. Stąd też dla systemów bezpieczeństwa państwa niebagatelne jest:

- podkreślenie, że wysoki standard zdrowia mieszkańców kraju, i potencjalnie jego kreatorów rozwoju cywilizacyjnego, a w sytuacjach ekstremalnych jego obrońców, jest niezbędna sprawność psychofizyczna, m.in. dla zapewnienia poczucia bezpieczeństwa i funkcjonowania kraju realizowanego poprzez jego obywateli (służby mundurowe, kreatywni naukowcy, ochrona ludności, itp.),
- ponadto powadżąc rozważania dotyczące eksploatacji przyrody, należy mieć na względzie również to, że niekiedy dochodzi do powstania konfliktu w relacji: człowiek vs. środowisko, a skutki negatywne odnoszą się obydwu elementów tej zależności,
- iż, w wyniku zbyt ekspansywnego działania człowieka może dochodzić do degradacji środowiska przyrodniczego, które w takim stanie wpływa negatywnie na stan zdrowia i samopoczucie człowieka oraz jego funkcjonowanie zdrowotne, społeczne, kulturowe i zawodowe, a w konsekwencji te następstwa są związane z bezpieczeństwem państwa, które ponosi koszty organizacji opieki nad osobami z problemami zdrowotnymi.

Należy również nadmienić, że współczesny człowiek epoki antropocenu[§], eksploatując przyrodę dla rozwoju cywilizacyjnego, zwraca coraz częściej uwagę na ekologię i kryzys klimatyczny. Niemniej jednak, kryzysy cywilizacyjne intensywnie oddziałują na stan psychofizyczny oraz materialny wielu ludzi, a niekiedy nawet na całe lokalne społeczeństwa poprzez szkody materialne (powodzie, tornada, pożary, itp.). Ponadto, również ww. zmiany środowiskowe, powodują u wielu osób zaburzenia emocjonalne, których skutki są rozważane przez solastalgię czy psychologię środowiskową oraz ekopsychologię, ekopsychiatrię. Przeobrażenia i zależności w tym zakresie obrazuje poniższa rycina.

[§] Antropocen jest często określany jako epoka odpowiedzialności, zmuszająca do refleksji nad przekraczaniem granic naturalnej równowagi w przyrodzie, związanej z ekspansywnym funkcjonowaniem człowieka w środowisku.



Rys. 2. Komiksowa wersja przebiegu procesu ewolucji. Za: Dan Piraro, www.bizarro.com
Źródło: <https://nauka.uj.edu.pl>

3. ŚRODOWISKO PRZYRODNICZE A ZDROWIE

3.1. Wpływ pozytywny kontaktu ze środowiskiem przyrodniczym na samopoczucie

Kontakt z przyrodą, przebywanie na łonie natury ma wiele korzyści dla psychiki, ponieważ wpływa pozytywnie na zdrowie psychiczne, na działanie układu nerwowego, hormonalnego i odpornościowego. Zatem, ma działanie antystresowe, antydepresyjne, redukuje lęki egzystencjalne, oddziałuje terapeutycznie poprzez zwiększanie dobrostanu psychicznego, poczucie sensu życia. Prócz tego wpływa na obniżenie poziomu hormonu stresu, czyli kortyzolu oraz redukuje ciśnienie krwi i poprawia samopoczucie.**

Konkludując środowisko przyrodnicze ma dla człowieka działanie zarówno profilaktyczne (np. lasoterapia), jak i terapeutyczne (np. obserwowanie ptaków-ornitologia) a ponadto, poprawia nastrój oraz pozytywnie wpływa na funkcje poznawcze poprzez redukcję bodźców cyfrowych oraz obniżenie poziomu kortyzolu w organizmie.

Mechanizmy oddziaływania na psychikę są realizowane poprzez percepcję środowiska, przez poszczególne zmysły i są one następujące [Khan 2012]:

** <https://cbt.pl/poradnie/jak-natura-wplywa-na-nasze-zdrowie-psychiczne/>

- zmysł wzroku- zielone barwy oraz często fraktalne kształty liści działają pozytywnie na mózg,
- zmysł węchu- naturalne leśne związki chemiczne, np. olejki eteryczne (fitocenty), stymulują układ odpornościowy, obniżają poziom stresu i ciśnienie krwi, a tym samym również poprawiają samopoczucie.
- zmysł słuchu- naturalne dźwięki, takie jak szum lasu redukują poczucie przytłoczenia cywilizacją, a śpiew ptaków często zachwyca, wywołuje pozytywne nastawienie do życia.

Wszystkie wymienione oddziaływania wpływają pozytywnie na stan psychiczny, redukują emocje, czy minimalizują stres zawodowy oraz/i cywilizacyjny.

3.2. Negatywne oddziaływanie środowiska przyrodniczego na psychikę

Środowisko przyrodnicze, w który egzystuje człowiek, niewątpliwie wpływa na jego aktualne samopoczucie, zrówno pozytywnie, jak wspomniano powyżej, ale również może oddziaływać negatywnie, poprzez kumulację wielu czynników przyrodniczych.

Refleksję egzystencjalną, ekologiczną i solastologiczną stwarza analiza poniższego obrazka.



Rys. 3. Samopoczucie związane z percepcją przyrody zależnie od jej stanu.

Źródło: <https://www.climatepsychiatry.org/>

W swoich rozważaniach dotyczących ww. problematyki, Monika Koczoruk [2019] przytacza dane Światowej Organizacji Zdrowia^{††}, z których wynika, że ok. 12-18% wszystkich zgonów w Europejskim Regionie WHO jest skutkiem negatywnego oddziaływania środowiska zewnętrznego. Stąd też, istotne jest poszukiwanie metod redukcji tych negatywnych determinant zdrowia, a także poszukiwania ekologicznych źródeł energii (np. czystej energii), które umożliwią dalszy rozwój cywilizacyjny społeczeństw, ale bez degradacji zasobów środowiska naturalnego, a poprzez to nie będące negatywnych oddziaływań na stan psychiczny i fizyczny człowieka.

3.3. Działania prozdrowotne w celu poprawy jakości i komfortu życia ludzi.

Postęp cywilizacyjny wpływa na wiele zmian klimatycznych, a także społecznych, więc wymaga interdyscyplinarnej współpracy i integracji wielu dyscyplin wiedzy. Poprzez to współdziałanie, można określić zależność między światem przyrody (natury), a kondycją psychofizyczną współczesnego człowieka, jego dobrostanem i poczuciem szczęścia.

Współcześnie istnieje wiele inicjatyw społecznych, edukujących i naukowych, propagujących poprawą zdrowia a także jakości życia poprzez wspieranie działań prośrodowiskowych. Są to np.:

- czysta energia- mająca różne oblicza, a jest ona kreowana przez różne dziedziny wiedzy, poszukujących nowych, innowacyjnych i ekonomicznych, oraz proekologicznych rozwiązań, które poprzez odnawialną energię poprawiają/zabezpieczą komfort egzystencji społeczeństw dążących do tzw. etycznej konsumpcji, szanującej prawa przyrody,
- wsparcie działań środowiskowych w zakresie zdrowia publicznego: model ekologiczny zdrowia publicznego, świadomość ekologiczną społeczeństwa,
- kreowanie politycznych strategii proekologicznego rozwoju cywilizacyjnego,
- tworzenie strategii w zakresie ochrony środowiska,
- promocji zdrowia na różnych etapach edukacji: dzieci, młodzieży, dorosłych,
- współpraca międzynarodowa poprzez wyminę doświadczeń,
- powstanie nowych subdyscyplin wiedzy: ekoinżynieria, ekopsychologia, ekopsychiatria, ekoterapia, solastologia, ekolingwistyka, sozologia, sozotechnika, filozofia przyrody, itp.,
- pozyskanie wiedzy i wykształcenie umiejętności prozdrowotnych i proekologicznych w zakresie zdrowego trybu codziennego funkcjonowania oraz żywienia i odżywiania się,

^{††} Światowa Organizacja Zdrowia- World Health Organization (WHO) jest wyspecjalizowaną agencją ONZ odpowiedzialną za międzynarodowe zdrowie publiczne

- tworzenie nowych modeli funkcjonowania człowieka: homo sustinens, homo ecologicus, które zintensyfikują interdyscyplinarne, proekologiczne badania naukowe, przez co umożliwią dalszy rozwój cywilizacyjny bez negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

Każdy z ww elementów będzie przedmiotem kolejnych opracowań.

Reasumując, bezpieczeństwo państwa i jego obywateli, będzie można zabezpieczyć wtedy, kiedy zapewnimy czystą energię, która będzie proekologiczna i innowacyjna, ale również nie będzie negatywnie wpływała na stan zdrowia fizycznego i psychicznego.

Konkludując powyższe rozważania dotyczące relacji między postępowaniem cywilizacyjnym, eksploatacją przyrody i poszukiwaniem ekologicznych źródeł czystej energii oraz wpływu tych działań na dobrostan ludzi, a także na zdrowie i życie, warto przyzwać trafną sentencję sformułowaną przez uczonego, chemika, laureata Nagrody Nobla:

„Nie możemy przewidzieć przyszłości, ale możemy się na nią przygotować”

(Prigogine)

Ponadto, aby wcielić powyższe stwierdzenia w działania, związane z pozyskiwaniem czystej energii dla rozwoju cywilizacyjnego, warto pamiętać o aforyzmach wybitnego chińskiego mędrca i filozofa zawartych w Dialogach konfucjańskich^{‡‡}.

„Przyroda bez człowieka może żyć, ale człowiek bez przyrody zginie”

(Konfucjusz)

LITERATURA

1. Albrecht G., Sortore G., Connor L., Higginbotham N., Solastalgia: The Distress Caused by Environmental Change, 2007, Australasian Psychiatry, 15 Suppl 1(1): S95-98.
2. Cizek Mariusz, Środowisko człowieka i jego bezpieczeństwo. Zarys koncepcji bezpieczeństwa środowiskowego (ekologiczno-zdrowotnego) (w kręgu interdyscyplinarnej filozofii postrzegania środowiska), Humanum- Międzynarodowe Studia Społeczno-Humanistyczne, 32 (1) 2019, 1-6,
3. Cikała-Kaszowska K., 2016, Ponowoczesna koncepcja szczęścia, Logos i Ethos, 40: 63-75.
4. Doherty, T. J., Clayton. S., 2011, The psychological impacts of global climate change. American Psychologist, 66, 265-276.
5. Filipova T., Kopsieker L., Gerritsen E., Bodin E., Brzezinski B. i Rubio-Ramirez O., 2020, „Zdrowie psychiczne a środowisko: W jaki sposób polityka europejska może lepiej odzwierciedlać wpływ degradacji środowiska na zdrowie psychiczne i dobrostan ludzi”.

^{‡‡} <https://pl.wikipedia.org/wiki/Konfucjusz>

Dokument informacyjny Instytutu Europejskiej Polityki Środowiska (IEEP) i Barcelońskiego Instytutu Zdrowia Globalnego (ISGlobal).

6. Gilfford R., 2011, The dragons of inaction: Psychological barriers that limit climate change mitigation and adaptation, „American Psychologist” 2011, nr 66, s. 290-302.
7. Koczoruk M., 2019, Model homo sustinens oraz homo ecologicus we współczesnej koncepcji zdrowia publicznego, *Medycyna Środowiskowa – Environmental Medicine*, Tom 22, Nr 3–4, 33–38.
8. Kahn, P. H., & Hasbach, P. H. (Eds.) (2012). *Ecopsychology: Science, totems, and the technological species*. Cambridge, MA: MIT Press.
9. Pardon M. K., Dimmock J, Chande R., Kondracki A., Reddick B., Davis A., Athan A, Buoli M, Barkin J.L., 2014, Mental health impacts of climate change and extreme weather events on mothers, *Eur J Psychotraumatol.* 15(1).
10. Stokols, D., Misra, S., Runnerstrom, M. G., & Hipp, J. A. (2009). Psychology in an age of ecological crisis: From personal angst to collective action. *American Psychologist*, 64(3), 181–193.
11. Terelak J.F., 2011, Człowiek w sytuacji pracy w okresie ponowoczesności, Wydawnictwo Unwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego, Warszawa.
12. Tryjanowski P., Murawiec S., Grimalt R., 2022, Przyroda i Zdrowie psychiczne. Ptasiarstwo to sprawdzone rozwiązanie, *Forum Akademickie, FA* 7-8.2022.

Netografia

1. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Konfucjusz>.
2. <https://miesiecznik.forumakademickie.pl/czasopisma/fa-7-8-2022/przyroda-i-zdrowie-psychiczne%E2%80%A9/>.
3. <https://www.climatepsychiatry.org/major-topics-in-climate-psychiatry/solastalgia-missing-home-while-being-home>.
4. <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pan3.70090>.
5. <https://nauka.uj.edu.pl/aktualnosci/>.
6. <https://cbt.pl/poradnie/jak-natura-wplywa-na-nasze-zdrowie-psychiczne/>.
7. <https://www.climatepsychiatry.org/major-topics-in-climate-psychiatry/solastalgia-missing-home-while-being-home>.
8. <https://www.google.com/search?q=środowisko+przyrodnicze+a+zdrowie+psychiczne>.

**PSYCHOLOGICAL ASPECTS OF SOLASTALGIA AND THE
EXPLOITATION OF THE NATURAL ENVIRONMENT AND ITS
CONSEQUENCES FOR HUMANS**

Abstract

Contemporary opportunities, limitations, and prospects for acquiring and using "clean energy in state security systems" require a holistic analysis due to the multidisciplinary nature of the issue, the specific nature of which is an area of interest for many scientific disciplines. Specific fields of knowledge, with their scientific achievements and research apparatus, allow for the search for new energy sources, while simultaneously assessing the psychological determinants and costs of human effectiveness in today's highly complex social and technical environment. Attempts to solve many problems, such as acquiring clean energy, require defining the role of the *spiritus movens* from anthropological, technical, and psychological perspectives.

Keywords: human factor, ecological stress, clean energy, solastalgia.

Sebastian KOWALCZYK*

Katarzyna JANEK**

Wojciech ŻURAWSKI**

ROZWÓJ ENERGETYKI ODNAWIALNEJ A BEZPIECZEŃSTWO PAŃSTWA – ROLA NOWOCZESNEGO SYSTEMU WSPIERAJĄCEGO PROCESY PLANOWANIA I UZGODNIANIA INWESTYCJI W OBSZARZE OBRONNOŚCI PAŃSTWA

W związku z trwającymi, na terenie Polski, intensywnymi pracami w zakresie rozwoju projektów elektrowni wiatrowych, środowisko inwestorów prezentuje stanowisko, że często występuje brak spójności w zakresie komunikacji i uzgadniania tych projektów ze stroną wojskową. W efekcie może mieć wpływ na rozwój lądowej energetyki wiatrowej, a dodatkowo może uniemożliwić modernizację istniejących elektrowni wiatrowych, czyli tzw. repowering – zastępowania starszych turbin nowocześniejszymi, bardziej wydajnymi instalacjami. Bezpośrednio może przedkładać się to na bezpieczeństwo energetyczne naszego kraju. Odpowiedzią Ministerstwa Obrony Narodowej jest wprowadzenie możliwości zoptymalizowania procesu uzgadniania lokalizacji z przy użyciu najnowszych narzędzi cyfrowych. W ten sposób powstała idea rozwoju projektu „e-infrastruktura MON”, którego celem jest wdrożenie nowoczesnego systemu teleinformatycznego wspierającego procesy planowania i zagospodarowania przestrzennego oraz wspierającego uzgodnienia inwestycyjne w obszarze obronności państwa. Celem artykułu jest przedstawienie założeń projektu oraz wstępnych wyników przeprowadzonych testów w zakresie inwestycji w odnawialną energetykę lądową.

Słowa kluczowe: energetyka wiatrowa, bezpieczeństwo państwa, e-infrastruktura MON, planowanie przestrzenne

* Instytut Bezpieczeństwa i Rozwoju Infrastruktury Krytycznej

** Departament Infrastruktury w Ministerstwie Obrony Narodowej

1. WPROWADZENIE

Energetyka wiatrowa to źródło czystej i najtańszej energii na rynku, która może wesprzeć bezpieczeństwo energetyczne kraju. W obliczu wojny w Ukrainie w najlepiej pojętym interesie narodowym Polski jest nadanie priorytetu rozwojowi energetyki odnawialnej. Ponadto, energetyka wiatrowa tworzona jako źródła rozproszone, jest mniej podatna na zagrożenia fizyczne, a tym samym odporniejsza niż duże i scentralizowane źródła wytwórcze.

Energetyka wiatrowa po 2040 roku będzie fundamentem dekarbonizacji polskiej gospodarki. Zgodnie z Projektem KPEiK w tym czasie wiatr odpowiadać ma za 70% generacji w elektroenergetyce (136,9 TWh/r). Wdrożenie postanowień NZIA (Net-Zero Industry Act) w Polsce jest kluczowym elementem przyspieszenia rozwoju sektora energetyki wiatrowej i innych technologii związanych z dekarbonizacją gospodarki. NZIA wzmacnia założenia dyrektywy RED III (Renewable Energy Directive), przewidujące uproszczenie i przyspieszenie procesów uzyskiwania pozwoleń na realizację projektów związanych z odnawialnymi źródłami energii, poprzez wzmocnienie lokalnych łańcuchów dostaw w ramach UE. Dla Polski oznacza to m.in. przyspieszenie procedur administracyjnych, które często stanowią jedną z głównych barier dla realizacji projektów.

Ministerstwo Obrony Narodowej realizuje projekt „e-infrastruktura MON”, którego celem jest wdrożenie nowoczesnego systemu teleinformatycznego wspierającego procesy planowania i zagospodarowania przestrzennego oraz wspierającego uzgodnienia inwestycyjne w obszarze obronności państwa.

W pierwszej połowie 2026 r. prowadzone były testy integracyjne, wdrożenia pilotażowe oraz szkolenia użytkowników związanych z rozwojem lądowej energetyki odnawialnej. Zakończenie projektu planowane jest na 30 czerwca 2026 r.

W niniejszym artykule wskazano następujące cele realizowanego projektu przez MON:

– Zwiększenie efektywności procedur – obecny system oparty na tradycyjnej korespondencji i manualnym przetwarzaniu danych jest nie tylko czasochłonny, ale również narażony na błędy ludzkie. System informatyczny pozwoli na automatyzację procesów, co przyspieszy czas rozpatrywania spraw i zredukuje ryzyko pomyłek.

– Zintegrowanie danych – System informatyczny umożliwiający harmonizację danych przestrzennych z informacjami o granicach terenów zamkniętych, granicach stref ochronnych i ograniczeniach w zagospodarowaniu przestrzennym - zapewni lepszą koordynację i planowanie przestrzenne. Umożliwi to także łatwiejsze identyfikowanie potencjalnych konfliktów i sprzeczności między planowanymi inwestycjami a infrastrukturą obronną.

– Transparentność i dostępność danych – system informatyczny zwiększy transparentność procesów decyzyjnych i uczyni informacje łatwiej dostępnymi, co jest zgodne z trendami w nowoczesnej administracji. To z kolei poprawi zaufanie obywateli i przedsiębiorców do działalności instytucji państwowych.

– Wzmocnienie współpracy międzyresortowej i międzyinstytucjonalnej – ułatwienie wymiany informacji między różnymi organami administracji rządowej oraz jednostkami samorządu terytorialnego pozwoli na bardziej zintegrowane podejście do planowania i zagospodarowania przestrzennego, co jest kluczowe w kontekście bezpieczeństwa narodowego.

– Usprawnienie działalności Ministerstwa Obrony Narodowej w zakresie zarządzania przestrzenią kraju, co jest niezbędne w obliczu rosnących wymagań dotyczących obronności i bezpieczeństwa.

– Przyspieszenie reagowania na potrzeby obronne i bezpieczeństwa, poprzez usprawnienie zarządzania i dostosowanie przestrzeni do rosnących wymagań i zastosowań militarnych.

2. PROCES ROZWOJU FARM WIATROWYCH – PŁASZCZYZNA WSPÓŁPRACY STRONY INWESTORSKIEJ I WOJSKOWEJ

W ramach przeprowadzonych warsztatów z udziałem przedstawicieli Ministerstwa Obrony Narodowej oraz inwestorów farm wiatrowych udało się wypracować dialog, który z jednej strony pozwala przedstawicielom MON lepiej poznać proces dewelopmentu (rozwoju) farm wiatrowych, a z drugiej strony przedstawicielom inwestorów zrozumieć proces uzgadniania inwestycji obiektów wysokościowych przez MON.

2.1. Uzgadnianie lokalizacji inwestycji obiektów wysokościowych w MON

Opiniowanie lokalizacji obiektów wysokościowych w resorcie obrony narodowej w chwili obecnej odbywa się kompleksowo i wieloetapowo zgodnie z Art. 1 ust. 2 pkt 8 ustawy z dn. 27.03.2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym. Przepisy ustawy nakładają obowiązek uwzględniania w planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym potrzeb obronności i bezpieczeństwa państwa. Kluczowe w sprawie stają się opinie użytkowników przestrzeni powietrznej pod kątem wykorzystania poszczególnych sektorów w przypadku TSA oraz TRA. Jeśli chodzi o MCTR oraz MRT to zasada jest stała - brak przeszkód lotniczych tj. obiektów powyżej 100 m n.p.t. w tych przestrzeniach. Każdy obiekt stanowiący przeszkodę lotniczą wyłącza w części możliwość wykorzystania przestrzeni powietrznych MRT i MCTR zgodnie z przeznaczeniem (brak możliwości realizacji lotów koszących oraz na małych wysokościach). Dodatkowo dochodzą jeszcze aspekty związane z szkoleniem spadochronowym oraz zrzutami tary, funkcjonowaniem stacji radiolokacyjnych i pomocy radionawigacyjnych.

Organem resortu obrony narodowej wskazanym w Art. 87⁷ ustawy z dn. 03.07.2002 r. - Prawo lotnicze, do uzgodnień dokumentów z zakresu planowania i zagospodarowania przestrzennego oraz opiniowania lokalizacji inwestycji ze względu na wysokość zabudowy jest właściwy terytorialnie Ośrodek Zamiejscowy Centralnego Wojskowego Centrum Rekrutacji (OZ CWCR), który to po zasięgnięciu opinii pomocniczych organów opiniujących wydaje opinie i uzgodnienia za resort obrony narodowej.

Podstawowymi dokumentami normatywnymi pozwalającymi na przeprowadzenie procesu uzgadniania inwestycji wysokościowych są następujące:

– Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz. U. 2003 Nr 80 poz. 717),

– Ustawa dnia 3 lipca 2002 r. Prawo lotnicze (Dz. U. z 2022 r. poz. 1235 z póź. zm.),

– Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 stycznia 2021 r. w sprawie przeszkód lotniczych, powierzchni ograniczających przeszkody oraz urządzeń o charakterze niebezpiecznym,

– Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 27 grudnia 2018 r. w sprawie struktury polskiej przestrzeni powietrznej oraz szczegółowych warunków i sposobu korzystania z tej przestrzeni,

– Zarządzenie Nr 33/MON Ministra Obrony Narodowej z dnia 12 listopada 2024 r. w sprawie prowadzenia rejestru lotnisk i lądowisk wojskowych,

– Decyzja Nr 105/MON Ministra Obrony Narodowej z dnia 5 sierpnia 2021 r. w sprawie realizacji w resorcie obrony narodowej zadań z zakresu planowania i zagospodarowania przestrzennego,

– Decyzja Nr 146/MON Ministra Obrony Narodowej z dnia 3 października 2022 r. zmieniająca decyzję w sprawie realizacji w resorcie obrony narodowej zadań z zakresu planowania i zagospodarowania przestrzennego.

2.2. Proces rozwoju inwestycji farm wiatrowych na lądzie

Proces rozwoju projektów farm wiatrowych jest procesem wieloletnim i bardzo skomplikowanym. Proces rozwoju projektów wymaga prowadzenia działań na wielu płaszczyznach i trwa zazwyczaj od 5 do 10 lat, a składają się na niego poniższe najważniejsze etapy:

Wybór lokalizacji inwestycji pod farmę wiatrową, w tym:

– analizy miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego oraz strategicznej oceny oddziaływania na środowisko przygotowane przez gminę

– analiza możliwości pozyskania gruntów pod farmę i infrastrukturę (zawarcie umów przedwstępnych uprawniających do dysponowania gruntami)

– analiza uwarunkowań środowiskowych

– konsultacje z władzami lokalnymi z uwzględnieniem możliwości ewentualnej modyfikacji lub uchwalenia nowego MPZP

Analiza opłacalności inwestycji zawierająca m.in.:

– analiza pomiarów wietrzności, wielowariantowy dobór turbin, oszacowanie produktywności, określenie lokalizacji poszczególnych turbozespołów.

– analiza wykonalności i analiza kosztów przyłączenia do sieci

– opracowanie wstępnego biznesplanu

Badania środowiskowe

Procedury i formalności:

– uzgodnienia specjalistyczne

– uzyskanie prawa do dysponowania gruntem

– pozwolenie na budowę

– pozyskanie finansowanie i zakup technologii

– Rozpoczęcie budowy inwestycji.

Niestety w zakresie prowadzenia procesu rozwoju farm wiatrowych inwestor napotyka na wiele przeszkód, które w sposób istotny ograniczają potencjał powierzchni możliwych do wykorzystania w zakresie rozwoju energetyki wiatrowej.

Na zdjęciu poniżej zaprezentowano kolorem niebieskim możliwe do wykorzystania tereny pod rozwoju lądowej energetyki wiatrowej bez uwzględnienia ewentualnych protestów społecznych. Wśród licznych ograniczeń należy wskazać ograniczenia wynikające z:

– Zabudowa mieszkaniowa + odpowiednia odległość od niej

– Drogi publiczne (autostrady, ekspresowe, krajowe, wojewódzkie, powiatowe)

– Linie kolejowe

– Linie elektroenergetyczne wysokich i najwyższych napięć

– Stacje elektroenergetyczne

– Gazociągi przesyłowe

– Ropociągi

– Parki Narodowe

– Rezerwaty przyrody

– Obszary NATURA 2000

– Parki Krajobrazowe

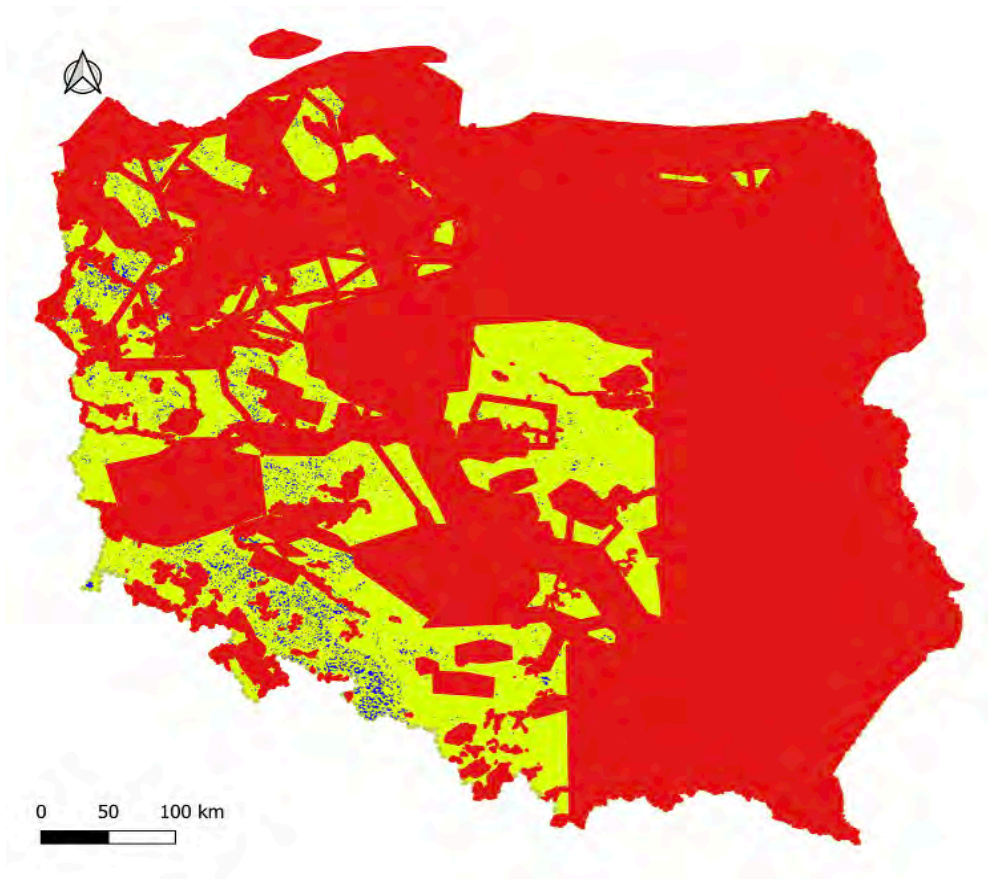
– Obszary Chronionego Krajobrazu

– Zespoły Przyrodniczo – Krajobrazowe

– Obszary IBA (Important Bird and Biodiversity Areas)

– Strefy Ochrony Gniazd

- Lasy i szpalery drzew
- Użytki ekologiczne
- Rzeki i Jeziora
- Obszary zalewowe
- Lotniska cywilne wraz ze strefami ograniczeń
- Lotniska wojskowe wraz ze strefami ograniczeń
- Strefy ochrony urządzeń lotniczych BRA i LUN
- Tereny zamknięte
- Istniejące farmy fotowoltaiczne
- Istniejące elektrownie wiatrowe
- Grunty rolne podlegające ochronie
- Grunty KOWR (nie ma zakazu, ale procedura bardzo skomplikowana)



Rys. 1. Tereny pod rozwój inwestycji lądowej energetyki wiatrowej wg PSEW

Inwestorzy na samym początku realizacji inwestycji, w zakresie analiz opiniowania planów ogólnych i procedur związanych z uzgadnianiem miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego ustalają z Gminą możliwość realizacji inwestycji. Na tym etapie Inwestorzy występują o opinię lokalizacji inwestycji poprzez kontakt z właściwym terytorialnie Ośrodkiem Zamiejscowym Centralnego Wojskowego Centrum Rekrutacji (OZ CWCR) natomiast Gmina wysyła do strony wojskowej zaawansowane wiadomości o przystąpieniu do sporządzenia miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego oczekując od strony wojskowej wniosków do tego planu. Na tym etapie Inwestor ponosi środki finansowe na poziomie od 500 tys do około 1 miliona złotych.

Inwestorzy farm wiatrowych na lądzie wskazują obecnie następujące największe wyzwania w zakresie rozwoju posiadanych projektów dotyczących uzgadniania ich z Rezerwową Obrony Narodowej:

- pojawiają się przypadki projektów, gdzie decyzje odmowne uzgodnienia inwestycji są na zaawansowanym etapie procesu projektu, co generuje poważne ryzyko dla inwestora,

- wskazywana jest zmienność rozstrzygnięć uzgodnieniowych - organy wojskowe wydają zarówno opinie pozytywne, jak i całkowicie lub częściowo negatywne – również dla terenów, gdzie już funkcjonują elektrownie wiatrowe. Utrudnia to planowanie inwestycji.

- istnieje ryzyko zmienności stref MRT/MCTR - granice stref mogą ulec zmianie lub mogą zostać wyznaczone nowe obszary, co skutkować może zablokowaniem projektów już uzgodnionych lub przygotowanych do realizacji,

- istnieje ryzyko związane z zatrzymaniem inwestycji w związku z wyznaczeniem stref tymczasowych - przestrzenie tymczasowe (TSA, TRA) są wyznaczane bez przejrzystych kryteriów oraz bez wskazania czasu trwania ich ustanawiania i aktualizacji,

- brak mechanizmów ochrony inwestycji zaawansowanych - aktualne i projektowane przepisy nie chronią inwestycji będących na końcowym etapie przygotowań lub już uzgodnionych – co oznacza ryzyko utraty poniesionych nakładów.

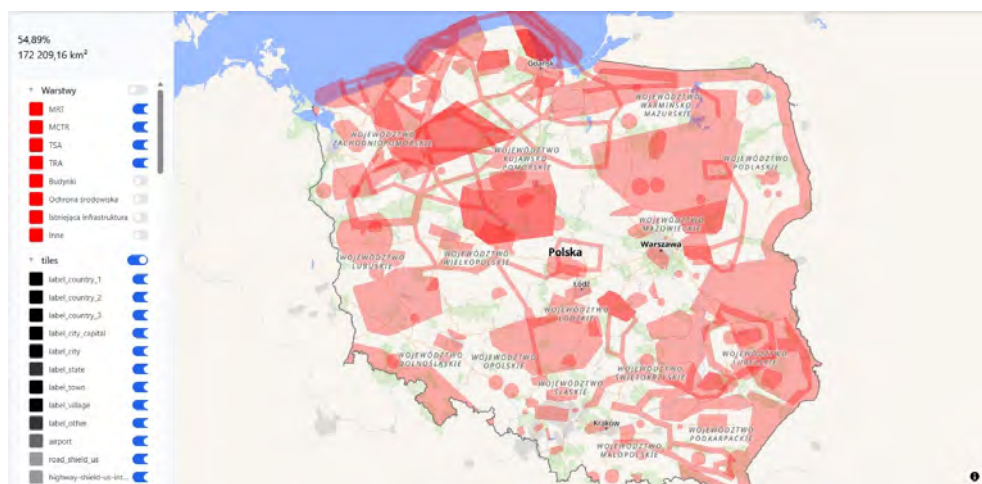
3. POTRZEBA PROJEKTU E-INFRASTRUKTURA

W związku z uruchomieniem dialogu pomiędzy stroną wojskową a inwestorami, od kwietnia 2025 roku, prowadzone są spotkania warsztatowe z udziałem przedstawicieli MON oraz inwestorów w zakresie optymalizacji procesu rozwoju energetyki odnawialnej z zachowaniem funkcji bezpieczeństwa i obronności kraju. Dodatkowo od stycznia 2026 uruchomiono współpracę w zakresie wdrażania narzędzi projektu e-infrastruktura MON, wypracowywanych przez MON.

Celem tych działań jest optymalizacja skomplikowanego i długotrwałego procesu rozwoju inwestycji farm wiatrowych, która wymaga ciągłej płaszczyzny komunikacji pomiędzy różnymi organami administracyjnymi i przedstawicielami resortów odpowiedzialnych za kwestie obronności i bezpieczeństwa Państwa.

Ważnym więc jest uwzględnienie stref przestrzeni powietrznej na wstępnym etapie projektów oraz na etapie ustalania miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego. Inwestorzy podkreślają realną potrzebę zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju, stąd kluczowa jest prawidłowa komunikacja z przedstawicielami MON.

Pierwszym efektem prowadzonych działań i wdrażanych narzędzi projektu e-infrastruktura MON jest określenie realnego wpływu stref przestrzeni powietrznej na możliwości rozwoju inwestycji farm wiatrowych na terytorium Polski. Poniżej zamieszczono symulację ograniczeń wynikających z istniejących stref przestrzeni powietrznej: MRT, MCTR, TRA i TSA. Przeprowadzone wyliczenia wskazują na możliwość ograniczenia około 55% powierzchni kraju.



Rys. 2. Tereny ograniczeń rozwoju lądowej energetyki ze względu na istniejące strefy przestrzeni powietrznej

Propozycja resortu obrony narodowej związana jest więc z opracowaniem zintegrowanego dostępu do danych w szczególności danych przestrzennych i usług publicznych. Przyczyni się to do zwiększenia dostępności informacji, jak również poprawy relacji państwa z obywatelem poprzez usprawnienie zaplecza elektronicznej administracji.

Bezpośrednim celem projektu e-infrastruktura MON jest udostępnienie inwestorom zestawu e-usług:

- zgłaszanie lokalizacji przeszkód lotniczych i wnioski o zaopiniowanie lokalizacji obiektu,
- opiniowanie budowy lądowych farm wiatrowych,

- uzgadnianie decyzji o warunkach zabudowy,
- udostępnianie nieruchomości wojskowych,
- uzgadnianie lokalizacji lądowych farm fotowoltaicznych,
- uzgadnianie zezwoleń na realizację inwestycji drogowych,
- uzgadnianie decyzji o ustaleniu lokalizacji inwestycji celu publicznego,
- wnioski do MPZP, uzgodnienie MPZP oraz opiniowanie planów ogólnych,
- opiniowanie budowy farm wiatrowych i zespołów urządzeń w polskich obszarach morskich.

W związku z powyższym, jak wspomniano, MON uruchomił cykl spotkań z inwestorami i przedstawicielami jednostek samorządu terytorialnego celem omówienia przypadków, w ramach których narzędzie e-infrastruktura może być testowana. W ramach kilku warsztatów udało się:

Przeprowadzić prace przygotowawcze:

- pozyskano i wstępnie opracowano realne przypadki użycia, w tym głównie od Inwestorów, gdzie zastosowanie znajdują wypracowywane narzędzia,
- przeprowadzić weryfikację procesu uzgodnienia z MON (BIS/CWCR/komórki merytoryczne) co do kompletności i jawności,
- przygotowano agendy, materiały robocze i rejestry ustaleń.

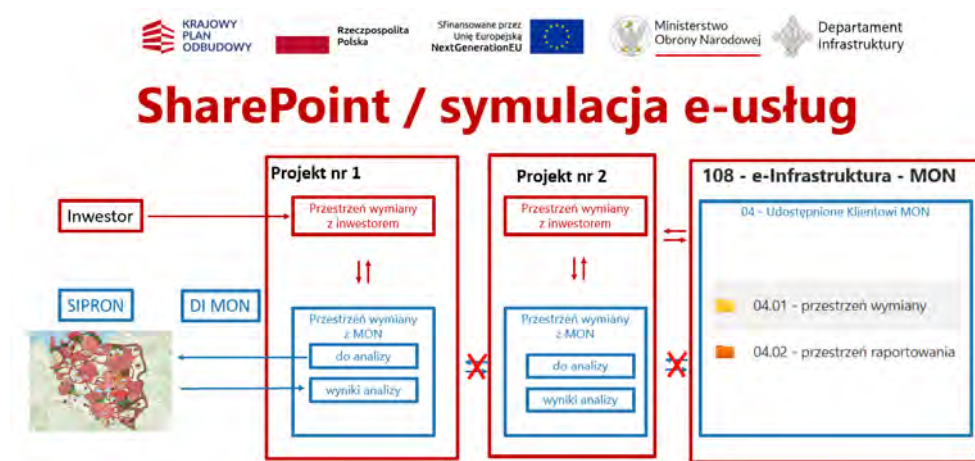
Przeprowadzono warsztaty stacjonarne oraz telekonferencje:

- moderowano pracę na use-case'ach (mapy procesów, punkty decyzyjne, wyjątki),
- doprecyzowano dane wejściowe/wyjściowe (np. formatów PL-2000, GML/SHP, WMS/WFS),
- uzgodniono treści kart e-usług.

Przeprowadzono pilotaż use-case „obrazowe use-case”:

- przegląd warstw (TZ/strefy/OOU, MRT/MCTR/TSA/TRA, korytarze, inne),
- zdefiniowano kryteria e-screeningu kolizyjnego i raportu,
- symulacje ścieżki e-opinia/e-uzgodnienie (pisma, paczki GIS, doręczenia).

W wyniku przeprowadzonych działań udało się opracować schemat blokowy możliwości współpracy inwestorów i przedstawicieli resortu obrony narodowej. Opracowany schemat ma umożliwić optymalizację procesu uzgadniania realizacji inwestycji już na wczesnym etapie życia projektu, co pozwoli zaoszczędzić znaczne środki finansowe ponoszone przez Inwestorów czy Gminy. Jednocześnie zaproponowane rozwiązanie usprawni proces wymiany informacji na temat istniejących i aktualizowanych stref przestrzeni powietrznej zagospodarowywanych istotnych dla bezpieczeństwa kraju.



Rys. 3. Symulacja procesu wdrażanej e-usługi

4. WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH ANALIZ

Zgromadzone materiały jednoznacznie wskazują, że obecne otoczenie prawno-regulacyjne nie zapewnia stabilnych warunków rozwoju lądowej energetyki odnawialnej. Dodatkowym problemem jest również nieusystematyzowane podejście Inwestorów do samego procesu uzgadniania inwestycji.

Jednocześnie, energetyka wiatrowa – jako infrastruktura rozproszona – zwiększa odporność państwa na kryzysy, wzmacnia niezależność energetyczną i może być traktowana jako element potencjału obronnego (platforma dla urzędów monitorujących, zwiększona redundancja energetyczna). W tym kontekście szczególnie istotne jest stworzenie trwałego mechanizmu komunikacji między inwestorami a Ministerstwem Obrony Narodowej. Inwestorzy deklarują gotowość do wspierania działań obronnych poprzez wdrażanie rozwiązań technicznych i organizacyjnych umożliwiających bezpieczną koegzystencję infrastruktury energetycznej z potrzebami Sił Zbrojnych RP.

Przeprowadzone pierwsze testy z użyciem tzw. use case'ów zgłaszanych przez partnerów projektów pozwala pozyskać następujące wnioski:

– Inwestorzy farm wiatrowych pozyskują pełen obraz jak wygląda proces opiniowania lokalizacji obiektów wysokościowych w resorcie Obrony Narodowej, który w chwili obecnej odbywa się kompleksowo i wieloetapowo zgodnie z Art. 1 ust. 2 pkt 8 ustawy z dn. 27.03.2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym nakładającym obowiązek uwzględnienia w planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym potrzeb obronności i bezpieczeństwa państwa

– zaprezentowano przedstawicielom Inwestorów możliwość współpracy w zakresie wdrażania nowego narzędzia e-usługi. System znacząco usprawni proces opiniowania nowych lokalizacji, ze względu na cyfrowy przebieg dokumentacji oraz uwzględnianie dokumentów w odpowiednim formacie a nie jak dotychczasowo w wersji papierowej, która każdorazowo wymagała obróbki. Projektowany system będzie zawierał aktualne informacje na temat MRT, MCTR, TSA i TRA. Jego wdrożenie spowoduje również odciążenie pracowników MON w zakresie procesu opiniowania aktualnych inwestycji,

– pojawia się możliwość zapewnienia stabilnych warunków rozwoju projektów znajdujących się na wcześniejszych etapach niż uchwalenie miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego (MPZP), tak aby nie blokować ich dalszego procedowania i możliwości wejścia w bardziej zaawansowaną fazę przygotowania inwestycji,

– pojawiły się możliwości ustalenia w strefach TSA i TRA dozwolonych wysokości budowy farm wiatrowych lub ustalić kombinację działań kompensujących, które powinny być zastosowane w zależności od planowanych wysokości budowy,

– powstała możliwość określenia zasad rozwoju inwestycji farm wiatrowych dla nowych lokalizacji oraz tych już istniejących z możliwością ich rozbudowy o nowoczesne technologie (repowering).

Opracowana propozycja przez resort obrony narodowej przyczynia się do:

– ustanowienia stałego, instytucjonalnego kanału komunikacji pomiędzy MON a Inwestorami OZE (na wzór rozwiązań dla energetyki morskiej),

– wdrożenie systemu e-usług jako narzędzia komunikacji elektronicznej w procesie uzgodnieniowym,

– określenie jasnych, mierzalnych i przewidywalnych kryteriów uzgadniania planów miejscowych z MON w odniesieniu do stref MRT/MCTR/TSA/TRA,

– wprowadzenie przepisów przejściowych chroniących inwestycje już zaawansowane zatwierdzone wpływających bezpośrednio na bezpieczeństwo energetyczne kraju.

– zapewnienia zgodności i kompatybilności teleinformatycznej z prowadzoną reformą planistyczną.

ŹRÓDŁA FINANSOWANIA PROJEKTU

Całkowita wartość projektu wynosi 6,5 mln zł, z czego 5 mln zł stanowi dofinansowanie ze środków krajowego planu odbudowy i zwiększania odporności. Przedsięwzięcie obejmuje budowę systemu informatycznego oraz uruchomienie 9 (dziewięciu) e-usług publicznych umożliwiających elektroniczne składanie wniosków, integrację danych przestrzennych oraz automatyzację procesów administracyjnych. Źródło finansowania projektu: Środki Unii Europejskiej - C2.1.1 „E-usługi publiczne, rozwiązania, IT usprawniające funkcjonowanie administracji i sektorów gospodarki” Krajowego Planu Odbudowy i Zwiększania Odporności.

**DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY AND STATE SECURITY –
THE ROLE OF A MODERN SYSTEM SUPPORTING PLANNING AND
INVESTMENT AGREEMENT PROCESSES IN THE FIELD OF NATIONAL
DEFENCE**

Abstract

The article outlines the assumptions and initial test results of the Ministry of National Defence project "e-Infrastructure MON", which is intended to support spatial planning, land-use management and investment agreement procedures in the area of national defence. The analysis focuses on onshore renewable energy development, especially wind farms, and on the need to improve communication between investors and the military side. The proposed digital tools are designed to accelerate procedures, integrate spatial data, increase transparency and support the safe coexistence of strategic defence needs and energy investments.

Keywords: wind energy, state security, digital public services, spatial planning

Michał KRYSZTOFEK*

Marta ŚLEFARSKA**

Aleksandra NOWAK*

ZIELONY METANOL JAKO PALIWO ALTERNATYWNE DO ZASILANIA SYSTEMÓW GENERACJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPLNEJ

W artykule przeanalizowano potencjał zielonego metanolu jako paliwa alternatywnego mającego na celu wspomóc transformację energetyczną oraz poprawić bezpieczeństwo energetyczne kraju. Przedstawiono możliwości zagospodarowania metanolu w systemach energetycznych takich jak silniki spalinowe, turbiny gazowe i ogniwa paliwowe. Wskazano również ścieżki wytwarzania biometanolu i e-metanolu, oraz przedstawiono wyniki uproszczonej analizy kosztów produkcji biometanolu, z biogazu. Głównym kosztem produkcji biometanolu jest wytwarzanie zielonego wodoru w elektrolizerze, stąd w analizie porównano dwie technologie elektrolizerów PEM i SOEC. Wyniki pokazują, że zastosowanie elektrolizerów stało tlenkowych umożliwiających wykorzystanie ciepła odpadowego pozwala na znaczne obniżenie kosztów produkcji wodoru i tym samym biometanolu, co potwierdza zasadność rozwoju technologii Power to Methanol w najbliższej przyszłości.

Słowa kluczowe: zielony metanol, paliwa alternatywne, dekarbonizacja, dywersyfikacja źródeł energii

1. WPROWADZENIE

W Strategii Bezpieczeństwa Narodowego Rzeczypospolitej Polskiej przyjętej przez Radę Ministrów 25 lipca 2025 r. ujęto główne filary bezpieczeństwa państwa takie jak: nienaruszalność terytorium, bezpieczeństwo obywateli, zrównoważony rozwój oraz korzystny z punktu widzenia Polski kształt systemu bezpieczeństwa

* Politechnika Poznańska

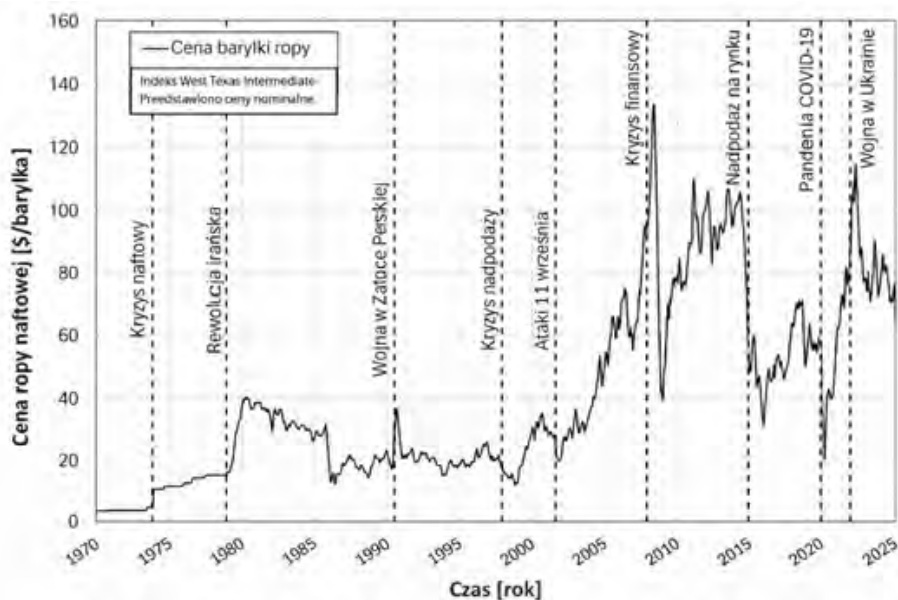
** Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu

międzynarodowego. Zapisy strategii wskazują na cztery główne obszary działań jakie należy podejmować, aby zagwarantować jak największy poziom bezpieczeństwa. Wśród tych działań można wymienić: wzmocnienie pozycji Polski w NATO i UE, rozwój zdolności odstraszania i obrony, wzmocnienia przemysłu obronnego, rozwoju nauki oraz bezpieczeństwa energetycznego, a także podejmowanie działań w obszarze bezpieczeństwa społecznego. Jednym z wymienionych obszarów jest bezpieczeństwo energetyczne, które zgodnie z art. 3 pkt. 16 ustawy Prawo energetyczne definiujemy jako: „stan gospodarki umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, przy zachowaniu wymagań ochrony środowiska”. W ujęciu tak przedstawionej definicji konieczne jest posiadanie przez Polskę wystarczających dostaw paliw i energii, posiadanie sprawnej infrastruktury do wytwarzania, importu, przesyłu i magazynowania paliw i energii przy zachowaniu akceptowalnych kosztów dla gospodarki, oraz bez negatywnego oddziaływania na środowisko. W pracy [Gitelman, L. et al. 2023] podają jako główne komponenty bezpieczeństwa energetycznego ciągłość dostaw oraz dostęp do zasobów energii. Wskazują na konieczność dywersyfikacji źródeł energii oraz kierunków ich pochodzenia geograficznego w celu ograniczenia ryzyka zakłóceń dostaw. Innymi czynnikami wpływającymi na niezawodność dostaw energii są efektywność infrastruktury, uwarunkowania techniczne oraz stabilność geopolityczna [Salameh M.G., 2023]. Ponadto, bezpieczeństwo energetyczne kraju wymaga stabilnych i racjonalnych cen energii i paliw, aby móc wspierać wzrost gospodarczy kraju i zapobiegać niestabilności rynków [Lean, 2025].

Polska zwiększa swoją niezależność energetyczną poprzez realizację inwestycji w sektorze energetycznym np. budowa pierwszej elektrowni atomowej, intensyfikacja inwestycji w odnawialne źródła energii (energetyka wiatrowa i fotowoltaika). Ponadto od wielu lat prowadzi działania w obszarze dywersyfikacji dostaw paliw. Dobrym przykładem jest sektor paliw gazowych, gdzie w 2015 roku uruchomiono terminal LNG umożliwiający import skroplonego gazu ziemnego z alternatywnych kierunków np. ze Stanów Zjednoczonych czy Kataru, a w roku 2022 uruchomiono gazociąg Baltic Pipe, który umożliwi dostawy gazu z Norwegii, wzmocniając tym samym niezależność energetyczną Polski. W sektorze paliw płynnych firma Orlen całkowicie uniezależniła się od dostaw ropy z Rosji (od lipca 2025 roku), opierając zaopatrzenie kraju na dywersyfikacji z kierunków takich jak Bliski Wschód, Norwegia (morze Północne), Afryka i obie Ameryki.

Dywersyfikacja dostaw paliw nie zapobiega w pełni fluktuacji cen paliw na rynku krajowym. Ceny te są silnie uzależnione od zagrożeń geopolitycznych, kryzysów gospodarczych oraz światowej dynamiki podaży i popytu. Konflikty, takie jak wojna na Ukrainie, czy na Bliskim Wschodzie, prowadzą do gwałtownych wahań cen, co wymaga odpowiednich działań politycznych i gospodarczych w celu minimalizacji ich skutków. Bardzo podatnym paliwem jest ropa naftowa i paliwa ropopochodne, ponieważ ich ceny silnie reagują na konflikty międzynarodowe, blokady szlaków morskich, decyzje krajów OPEC i problemy w krajach wydobywczych. Mimo że

ropa jest sprzedawana globalnie, jej rynek jest wyjątkowo wrażliwy na wszelkie kryzysy. Zmianę ceny baryłki ropy naftowej w okresie od 1970 do 2025 roku pokazano na rys. 1. Analizowany okres nie zawiera zmian cen ropy, po rozpoczęciu wojny Izraela i Stanów Zjednoczonych z Iranem. Jednak, od dnia 1.03 do dnia 31.03.2026 cena ropy Brent na rynku kontraktów krótkoterminowych wzrosła o około 54% z poziomu 70,5 do wartości 109 USD za baryłkę, a cena benzyny o około 40%. Analiza danych wskazuje jednoznacznie, że sytuacje kryzysowe występujące nawet w odległych zakątkach Świata wpływają na bezpieczeństwo energetyczne naszego kraju, poprzez brak dostępności surowców energetycznych lub ekstremalnie wysokie ceny, które mogą wpływać na niestabilność rodzimego rynku.



Rys. 1. Zmiana ceny baryłki ropy w okresie 1970-2025 z zaznaczonym wpływem zagrożeń

Oprócz dywersyfikacji kierunków dostaw oraz magazynowania paliw, poprawę bezpieczeństwa energetycznego kraju można uzyskać również poprzez wykorzystanie własnych zasobów energetycznych. Polska wydobywa rocznie około 700 – 900 tyś. ton ropy naftowej, co pokrywa jedynie ok. 3 - 4% krajowego zapotrzebowania. Lepiej sytuacja wygląda w przypadku gazu ziemnego, gdzie około 20% zapotrzebowania pochodzi z krajowej produkcji (w roku 2025 wydobyte krajowe wyniosło 3,4 mld m³). Przytoczone liczby wskazują, że nasz kraj jest uzależniony od importu paliw kopalnych. Zmniejszenie zapotrzebowania na paliwa klasyczne może być realizowane poprzez zwiększenie udziału tak zwanych paliw alternatywnych takich jak: biometan, wodór, amoniak, biodiesel, paliwa syntetyczne oraz paliwa typu

e-fuels. Paliwa syntetyczne oraz paliwa „electrofuels” to paliwa wytwarzane z użyciem energii elektrycznej, najlepiej pochodzącej z OZE. Powstają one zwykle przez połączenie wodoru uzyskanego w procesie elektrolizy wody z dwutlenkiem węgla albo azotem. Alternatywną ścieżką produkcji zielonych paliw są technologie bazujące na konwersji biomasy takie jak pyroliza, zgazowanie lub procesy biologiczne np. produkcja biometanu.

Jednym z paliw należącym do grupy e-fuels jest biometanol, który może być wykorzystywany do napędu silników spalinowych oraz w procesach cieplnych. Produkcja zielonego metanolu jest obecnie na 8-9 etapie gotowości technologicznej TRL (z ang. *Technology Readiness Level*), co oznacza technologię sprawdzoną w rzeczywistych warunkach operacyjnych. Jednakże, ze względu na wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, związane zwłaszcza z elektrolizą wody, w roku 2024 wyprodukowano zaledwie 0,5 mln ton biometanolu przy całkowitej podaży 94 mln ton. Największymi eksporterami metanolu na Świecie w 2024 roku były kraje takie jak Trynidad i Tobago, Oman oraz Arabia Saudyjska. Według danych przedstawionych przez Obserwatory of Economic Complexity Polska ma ujemny bilans dostaw metanolu, a głównym dostawcą metanolu do naszego kraju jest Belgia. Zestawienie największych eksporterów i importerów metanolu w ujęciu światowym w 2024 roku pokazano w tab. 1.

Tabela 1

Najwięksi eksporterzy i importerzy metanolu w 2024 roku

Eksporterzy metanolu		Importerzy metanolu	
Kraj	Udział w rynku [%]	Kraj	Udział w rynku [%]
Trynidad i Tobago	14,5	Chiny	29,4
Oman	12,5	Niderlandy	7,97
Arabia Saudyjska	11,7	Indie	6,83
Stany Zjednoczone	8,94	Brazylia	5,68
Zjednoczone Emiraty Arabskie	7,29	Korea Południowa	5,36
Iran	6,94	Niemcy	5,26
Niderlandy	4,51	Polska	1,86

2. ZASTOSOWANIE METANOLU W SYSTEMACH ENERGETYCZNYCH

Alkohol metylowy znany w przemyśle energetycznym jako metanol różni się właściwościami chemicznymi i fizycznymi od klasycznych paliw wykorzystywanych zarówno w transporcie jak i energetyce. Porównanie wybranych parametrów metanolu z paliwami wykorzystywanymi w przemyśle przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2

Przykładowe parametry wybranych paliw [Yu et al. 2020, Karvounis et al. 2023]

Paliwo	[-]	Metanol	Eta- nol	Ben- zyna	MGO	Me- tan	Wo- dór
LHV	MJ/kg	19,9	26,7	43,4	42,5	50	120
HHV	MJ/kg	23	29,7	46,4	45,6	55,5	142
Temperatura zapłonu	°C	11,1	17,2	-45	68	-	-
Temperatura samoza- płonu	°C	464	363	246-280	210- 250	540	500
Gęstość (20 °C)	kg/m ³	793	789	720-780	847	0,67	0,084
Dolna granica palności	%obj	6,7	3,3	1,4	0,6	4,4	4
Górna granica palno- ści	%obj	36	19	7,6	7,5	16,4	75
Ciepło parowania	kJ/kg	1100	846	310-340	359	-	-
AFR	kg/kg	6,5	9	14,7	14,3	17,65	34,2
Liczba oktanowa	[-]	111	108- 129	80-98	17	>120	>130
Liczba cetanowa	[-]	3	9	13-17	51	-	-

Metanol ma szersze granice palności od paliw konwencjonalnych takich jak Benzyna i MGO (Marine Gas Oil). Jest to korzystne ze względu na proces spalania, jednak może być problematyczne w kwestiach bezpieczeństwa. Metanol charakteryzuje się również wysoką liczbą oktanową wynoszącą 110, która zapewnia podwyższoną odporność na spalanie stukowe w porównaniu do benzyny posiadającej liczbę oktanową na poziomie 80-98. Główną wadą metanolu jest niska wartość opałowa. Stanowi ona około 45% wartości opałowej benzyny. Powodują to konieczność dostarczenia większej ilości paliwa w celu wygenerowania tej samej mocy. Niska energia na jednostkę masy paliwa stanowi problem dla wykorzystania metanolu w transporcie, ponieważ ogranicza to możliwości ładunkowe pojazdu. Korzyścią związaną ze stosowaniem metanolu w silnikach tłokowych jest niskie zapotrzebowanie na powietrze wynoszące 6,5 kg powietrza na kg paliwa. Umożliwia to spalanie większej ilości paliwa przy takim samym stopniu sprężania co zwiększa gęstość energetyczną mieszaniny.

Jedną z możliwości pozwalających na zagospodarowanie metanolu jest spalanie go jako paliwa w silnikach tłokowych. Stosuje się zarówno spalanie czystego metanolu

jak i domieszkowanie go do paliw konwencjonalnych. W pracy [Xie et al. 2013] przeprowadzili badania na zmodyfikowanym czterosurowym silniku z zapłonem bezpośrednim, w którym wtrysk czystego metanolu znajdował się w kolektorze dolotowym. W eksperymencie rozważano sterowanie pracą jednostki poprzez regulację stopnia recyrkulacji spalin oraz kąta wyprzedzenia zapłonu. Udało się uzyskać stabilną pracę dla pełnego obciążenia przy prędkości 1400 RPM i kątach zapłonu wynoszących 18, 15, 12° przed górnym martwym położeniem. W badaniach eksperymentalnych porównujących działanie silników typu flex-fuel zasilanych metanolem i benzyną [Vancoillie et al. 2013] zaobserwowano wzrost sprawności o około 10% w całym zakresie obciążeń. Powodem tego jest chłodzenie mieszanki podczas wtrysku paliwa w wyniku wysokiego ciepła parowania metanolu. Efekt ten wpływa na lepsze wypełnienie cylindra. Dodatkowo zwrócono uwagę na redukcje emisji NO_x o 5-10 g/kWh w wyniku osiągnięcia niższych temperatur spalania dla metanolu. Spalanie alkoholi w silnikach tłokowych powodują jednak problemy z zimnym startem. W niskich temperaturach proces odparowania metanolu jest pogorszony z powodu wysokiego ciepła utajonego i wysokiej higroskopijności. Wprowadza to konieczność zastosowania metod wspomagających rozruch w zimnych warunkach [Yuan et al. 2025]. W silnikach o zapłonie samoczynnym metanol spalany jest w postaci mieszaniny z paliwem diesla lub w technologii dual-fuel z osobnym wtryskiem diesla i metanolu. Głównym powodem stosowania diesla jest bardzo niska liczba cetanowa metanolu, mówiąca o zdolności do samozapłonu [Zhu et al. 2021]. W pracy [Liu et al. 2025] porównano pracę silnika na paliwie zasilanego dieslem i w trybie dual-fuel z 30% dodatkiem metanolu. Badania wykazały, że dla tych samych warunków roboczych jednostkowe zużycie paliwa jest o 7% mniejsze w trybie dual-fuel. Dodatek alkoholu spowodował jednak znaczny przyrost emisji węglowodorów oraz tlenu węgla w porównaniu ze spalaniem paliwa diesla. Efekt ten pogłębia się wraz z wzrostem prędkości obrotowej. Wprowadza to konieczność zastosowania rozbudowanych systemów oczyszczenia spalin.

Jednym z najbardziej obiecujących obszarów na wykorzystanie metanolu w silnikach tłokowych jest transport morski. Już w 2016 na rynek została wprowadzona jednostka dwusurowa firmy MAN B&W ME-LGIM zdolna do pracy zarówno na metanolu w technologii dual-fuel jak i paliwie konwencjonalnym. Jest to dojrzała technologia przeznaczona zarówno dla nowych jak i modernizowanych jednostek. Firma Rolls-Royce ogłosiła przeprowadzenie pozytywnych testów wysokoobrotowego silnika o mocy 2 MW zasilanego wyłącznie metanolem. Taki silnik może być wykorzystywany w układach generacji energii elektrycznej w tzw. układach wyspowych.

Inną możliwością zagospodarowania metanolu jest spalanie go w silnikach turbiniowych. W 2023 roku [Net Zero Technology Centre 2023] Siemens we współpracy z Net Zero Technology Center przedstawili testy demonstracyjne turbiny SGT-A20 zasilanej bio-metanolem. Testy potwierdziły prawidłowe działanie we wszystkich przebadanych scenariuszach pracy: rozruch, obciążenie częściowe, pełna moc i stany przejściowe. Osiągnięto 80% redukcji NO_x oraz 10% redukcji emisji CO₂ w porównaniu do paliwa diesla. Wskazano również, że w celu poprawnego działania turbiny konieczna była modyfikacja systemu paliwowego z powodu znacznie niższej wartości

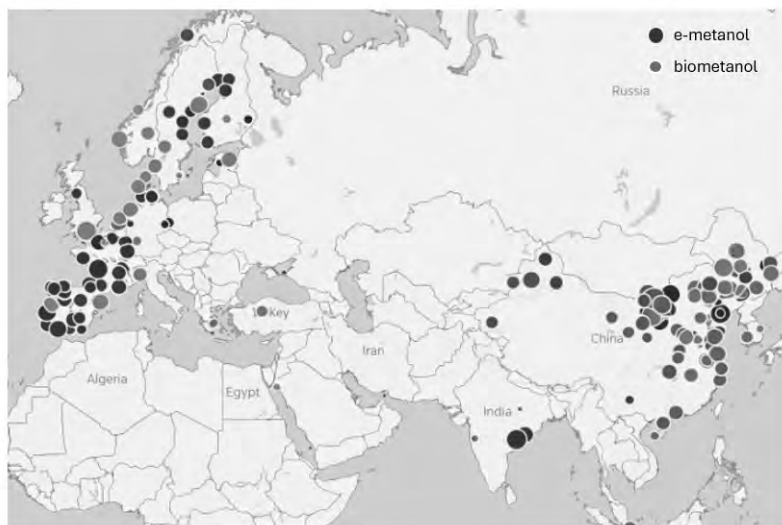
opałowej metanolu do diesla. Dodatkowo w celu zachowaniu bezpieczeństwa wykorzystano system detekcji płomienia w świetle podczerwonym, ponieważ płomień powstający w wyniku spalania metanolu jest niewidoczny dla oka ludzkiego.

Metanol może być również bezpośrednio przetwarzany na energię elektryczną z wykorzystaniem technologii DMFC (Direct Methanol Fuel Cell). W ogniwie tym ciekłe paliwo ulega utlenianiu na anodzie w obecności wody, prowadząc do powstania protonów, elektronów oraz dwutlenku węgla. Jednym z problemów jakie stawia ta technologia jest zjawisko przenikania metanolu przez membranę do katody. Powoduje to zarówno straty w paliwie jak i straty depolaryzacji przekładające się na obniżenie napięcia ogniwa [Heinzel, Barrágan, 1999]. Reakcje zachodzące na katodzie i anodzie są egzotermiczne, dodatkowo metanol przenikający przez membranę utlenia się wydzielając ciepło [Kamarudin, Ahmad, Daud, 2009]. Wprowadza to konieczność chłodzenia ogniwa. Kolejnym aspektem jaki należy rozważyć przy zastosowaniu ogniw DMFC jest gospodarka wodna. Podczas reakcji na anodzie woda jest zużywana, dodatkowo konieczna jest ona do przetransportowania protonów przez membranę. Zjawisko to w połączeniu z produkcją wody na skutek reakcji zachodzącej na katodzie powoduje ryzyko jej zalania. Nadmiar cieczy może powodować blokowanie dostępu tlenu do katalizatora co może negatywnie wpływać na działanie układu. W ogniwie należy więc odpowiednio zarządzać wodą, aby dostarczyć ją do anody i odebrać z katody. Należy również utrzymać odpowiedni poziom nasycenia membrany w celu zmniejszenia oporów transportu protonów [Li, Faghri, Xu, 2010]. Mimo problemów rozważa się zastosowanie DMFC w urządzeniach mobilnych jako alternatywę dla baterii. Główną przewagą metanolu jest wyższa gęstość energetyczna i niezależność od sieci energetycznej [Kamarudin, Ahmad, Daud, 2009].

Jak wskazano powyżej, prowadzone prace badawcze i wdrożeniowe wskazują na możliwości zastosowania metanolu jako paliwa w systemach energetycznych opartych o silniki spalinowe, ale również z zastosowaniem nowych technologii takich jak np. ogniwa paliwowe. Dzięki temu możliwe jest zmniejszenie uzależnienia się od klasycznych paliw kopalnych, których dostępność zwłaszcza podczas konfliktów zbrojnych może być ograniczona.

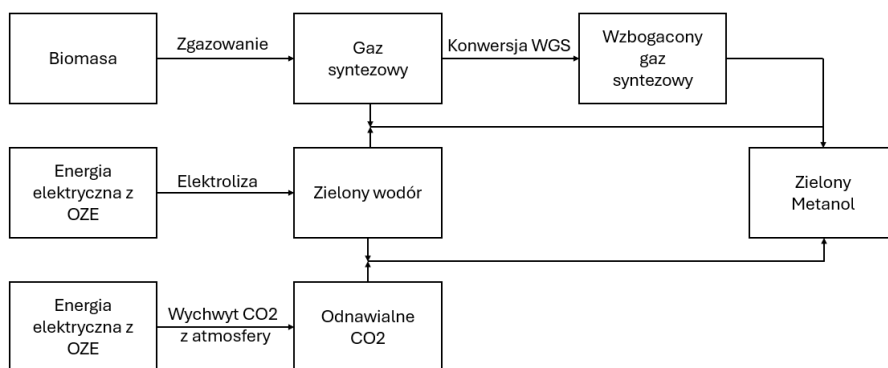
3. ZIELONY METANOL

Według analiz Methanol Institute w 2025 r. na świecie zostało ogłoszonych około 252 projektów dotyczących wytwarzania odnawialnego i niskoemisyjnego metanolu, o łącznej potencjalnej zdolności produkcyjnej wynoszącej 45,1 mln ton do roku 2030. Wśród realizowanych projektów wolumen produkcyjny równy 21,8 mln ton dotyczy projektów związanych z produkcją e-metanolu, a 23.3 mln ton z produkcją biometanolu. Liczby te wskazują na szybki rozwój rynku oraz dużą podaż biometanolu (niskoemisyjnego i zielonego) w najbliższej przyszłości. Lokalizację obecnie realizowanych projektów pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Lokalizacja projektów dotyczących produkcji zielonego metanolu [Methanol Institute]

E-metanol jest definiowany jako odnawialne syntetyczne paliwo ciekłe produkowane z zielonego wodoru powstałego w procesie elektrolizy wody oraz wychwyconego dwutlenku węgla pochodzenia biogenicznego, gdzie energia elektryczna potrzebna do procesu produkcji pochodzi ze źródeł energii odnawialnej. Natomiast biometanol to odnawialne paliwo produkowane z procesów termochemicznego przetwarzania biomasy (np. odpadów organicznych, surowców leśnych czy rolnych) oraz biogazu. Ścieżki produkcji e-metanolu i biometanolu pokazano na rys 3.



Rys. 3. Ścieżki produkcji zielonego metanolu [Wen Zhang et al. 2025]

Produkcja zielonego metanolu z biomasy poprzez procesy termo-chemiczne osiąga zwykle sprawności w zakresie 50-60%. Duży wpływ na efektywność procesu

ma źródło CO₂. Dla instalacji, w których CO₂ wychwytywane jest bezpośrednio z powietrza sprawności wahają się w przedziale 30-35%, natomiast dla CO₂ pochodzącego z oczyszczania biogazu mogą wynosić nawet powyżej 65%.

4. UPROSZCZONA ANALIZA KOSZTU PRODUKCJI ZIELONEGO METANOLU

W analizowanym układzie technologicznym produkcja zielonego metanolu realizowana jest w konfiguracji zintegrowanej z biogazownią wyposażoną w jednostkę kogeneracyjną CHP. Biogaz rozdzielany jest na dwa strumienie: metan oraz dwutlenek węgla. Metan wykorzystywany jest jako paliwo dla silnika kogeneracyjnego, natomiast wydzielony CO₂ kierowany jest do układu syntezy metanolu. Energia elektryczna produkowana w układzie CHP zasila elektrolizer, natomiast ciepło odpadowe z silnika wykorzystywane jest do przygotowania pary technologicznej dla procesu elektrolizy wysokotemperaturowej oraz do pokrycia zapotrzebowania cieplnego destylacji metanolu. Takie rozwiązanie ogranicza zapotrzebowanie na energię zewnętrzną oraz zmniejsza udział kosztów energii sieciowej w całkowitym koszcie produkcji paliwa. Typowe układy kogeneracyjne oparte na silnikach tłokowych osiągają całkowitą sprawność energetyczną na poziomie około 80% [Kylee Harris, R. Gary Grim, Ling Tao 2021; Alamia et al. 2024]. W analizie przyjęto referencyjny moduł instalacji obejmujący biogazownię o mocy elektrycznej 500 kW_e współpracującą z układem syntezy metanolu o wydajności około 50 kg/h, co odpowiada produkcji około 400 Mg metanolu rocznie. Dla takiej konfiguracji orientacyjna sprawność przekształcenia energii chemicznej biogazu w energię chemiczną metanolu wynosi około 35%. W analizie założono pracę instalacji przez 8000h/rok. Kaloryczność metanolu przyjęto równą HHV = 22.7 MJ/kg [Kylee Harris, R. Gary Grim, Ling Tao 2021; Alamia et al. 2024; Rinadli et al. 2023]. W tab. 3 zestawiono bilans energetyczny produkcji metanolu.

Tabela 3

Bilans energetyczny produkcji metanolu

Energia chemiczna biogazu	Energia elektryczna z silnika gazowego	Energia chemiczna metanolu	Jednostkowe zużycie energii elektrycznej
MWh/rok	MWh/rok	MWh/rok	MWh/Mg _{MeOH}
7206	4000	2522	10

Uzyskane wartości są zgodne z bilansem procesu produkcji metanolu [Mucci 2023; Rinadli et al. 2023] oraz z analizami literaturowymi wskazującymi, że domi-

nującym składnikiem kosztów operacyjnych pozostaje energia elektryczna zużywana do produkcji wodoru [Mucci 2023; Sollai 2023; Moser 2025]. Ilość potrzebnego wodoru wynika z reakcji syntezy metanolu ($\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$), gdzie na produkcję jednego mola metanolu wymagane są trzy mole wodoru. Na podstawie stosunku mas molowych jednostkowe zapotrzebowanie wodoru wynosi 0,1875 kg H₂/kg MeOH, czyli dla 1 Mg potrzeba 187,5 kg H₂. Jednostkowe zużycie energii elektrycznej na produkcję wodoru zależy od zastosowanej technologii elektrolizy. Typowe wartości wynoszą około 50–55 kWh/kg H₂ dla elektrolizera PEM [Sollai 2023; Franco 2023; Aminaho 2025] oraz 37–45 kWh/kg H₂ dla elektrolizy wysokotemperaturowej SOEC [Hussein 2025; Aminaho 2025]. W związku z powyższym dla elektrolizera PEM zapotrzebowanie wynosi 9,75 MWh/Mg MeOH, a dla SOEC 7,5 MWh/Mg MeOH. W analizie uwzględniono fakt, że elektroliza wysokotemperaturowa SOEC wymaga dostarczenia energii cieplnej [Hussein 2025; Alamia 2024], która w analizowanym systemie pochodzi z ciepła odpadowego jednostki CHP.

Szczegółowa analiza objęła cztery warianty produkcji H₂: elektrolizę PEM zasilaną energią elektryczną z układu CHP biogazowni, elektrolizę SOEC zasilaną energią elektryczną oraz ciepłem z układu CHP biogazowni, a także elektrolizę PEM zasilaną energią elektryczną z sieci elektroenergetycznej. Dodatkowo przeanalizowano wariant referencyjny elektrolizy SOEC zasilanej energią elektryczną z sieci elektroenergetycznej, wymagający jednocześnie zewnętrznego źródła ciepła technologicznego. W analizie przyjęto zakres cen energii elektrycznej od 60 do 100 €/MWh dla energii wytwarzanej w biogazowni oraz od 156 do 190,2 €/MWh dla energii z sieci zgodnie z danymi Eurostat 2025r. dla odbiorców przemysłowych w UE [Mucci 2023]. Koszt ciepła technologicznego przyjęto na poziomie około 40 €/MWh. Wyniki prognozowanych cen biometanolu przedstawiono w tab. 4.

Tabela 4

Koszt energii w produkcji metanolu dla analizowanych wariantów systemowych

Technologia	Źródło energii elektrycznej	Źródło ciepła procesowego	Koszt energii elektrycznej [€/Mg MeOH]
SOEC	CHP	CHP	450–750
PEM	CHP	–	585–975
PEM	sieć	–	1521–1855
SOEC (wariant referencyjny)	sieć	zewnętrzne źródło ciepła	>1245–1500

Powyższa analiza koncentruje się wyłącznie na jednym ze składników kosztów operacyjnych produkcji metanolu, a mianowicie na energii elektrycznej zużywanej w procesie wytwarzania wodoru. Najniższy koszt energetyczny uzyskano dla wariantu SOEC zasilanego energią elektryczną oraz ciepłem z układu CHP i wynosi on 450–750 €/Mg MeOH. Taka konfiguracja pozwala na zmniejszenie zużycia energii o 23% w porównaniu do technologii PEM. W analizowanym zakresie cen energii

elektrycznej oznacza to zmniejszenie kosztu energetycznego produkcji metanolu od 135-225 €/Mg MeOH przy energii z układu CHP, oraz aż o około 1100 €/Mg MeOH dla elektrolizera PEM zasilanego z sieci. Otrzymane rezultaty wskazują, że integracja instalacji Power-to-Methanol z biogazownią stanowi kluczowy czynnik redukcji zarówno kosztów operacyjnych, jak i całkowitego kosztu produkcji metanolu.

Należy mieć na uwadze, że pełna analiza techno-ekonomiczna powinna dodatkowo uwzględniać nakłady inwestycyjne instalacji obejmujące w szczególności koszty elektrolizera, reaktora syntezy metanolu, instalacji sprężania gazów, systemu separacji CO₂, instalacji destylacji oraz elementy infrastruktury pomocniczej. Dodatkowo jednostkowy koszt produkcji metanolu musi uwzględniać koszt dwutlenku węgla oraz koszt obsługi i konserwacji.

5. PODSUMOWANIE

Zielony metanol jest jednym z paliw alternatywnych wartych rozważenia w kontekście transformacji energetycznej. Możliwość jego wytworzenia z biogazu oraz nadwyżek energii elektrycznej z OZE wpływa pozytywnie na poprawę bezpieczeństwa energetycznego kraju, ograniczając jego zależność od paliw konwencjonalnych. Pomimo swoich odmiennych właściwości od paliw kopalnych może być wykorzystany w silnikach tłokowych zarówno jako paliwo samodzielne jak i dodatkowe w systemach spalania dwupaliwowego. Podobnie producenci turbin gazowych wykazują, że metanol może stanowić paliwo alternatywne dla generacji energii elektrycznej. Inną ścieżką zagospodarowania jest możliwość bezpośredniego przetworzenia na energię elektryczną przy wykorzystaniu ogniw paliwowych DMFC. Technologia ta jest szczególnie obiecująca w kontekście zasilania urządzeń mobilnych i awaryjnych systemów zasilania. Analiza kosztów wytwarzania zielonego metanolu wskazała, że kluczowym czynnikiem wpływającym na jego cenę jest koszt produkcji wodoru w procesie elektrolizy, oraz cena energii elektrycznej. Rozważone w artykule warianty produkcji biometanolu potwierdziły, że wykorzystanie ciepła odpadowego w elektrolizerze SOEC znacząco obniża koszty produkcji i cenę biometanolu wytwarzanego z biogazu.

Przedstawione w artykule analizy wskazują, że rozwój technologii Power-to-Methanol może stanowić istotny element rozwoju systemów energetycznych oraz ograniczania zależności od paliw kopalnych, przyczyniając się do zwiększenia stabilności i bezpieczeństwa systemu energetycznego.

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. A. Alamia, B. Partoon, E. Rattigan, G. Andresen, 2024, Optimizing hydrogen and e-methanol production through Power-to-X integration in biogas plants, *Energy Conversion and Management*, vol. 322, 119175
2. E. Aminaho, N. Aminaho, F. Aminaho, 2025, Techno-economic assessments of electrolyzers for hydrogen production, *Applied Energy*, vol. 399, 126515
3. A. Franco, C. Giovannini, 2023, Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives, *Sustainability*, vol. 15.
4. Lazar Gitelman, Elena Magaril, Mikhail Kozhevnikov, 2023, Energy Security: New Threats and Solutions, *Energies*, 16, 2689
5. A. Heinzl, V.M. Barragan, 1999, A review of the state-of-the-art of the methanol crossover in direct methanol fuel cells, *ELSEVIER, Journal of Power Sources*, n 84, s 70-74.
6. S.K. Kamarudin, F. Achmad, W.R.W. Daud, 2009, Overview on the application of direct methanol fuel cell (DMFC) for portable electronic devices, *ELSEVIER, international journal of hydrogen energy*, n 34, s 6902 – 6916.
7. Panagiotis Karvounis, Gerasimos Theotokatos, Ioannis Vlaskos, Antonios HatziaPOSTOLOU, Methanol Combustion Characteristics in Compression Ignition Engines: A Critical Review, 2023, *MDPI, Energies*, 16, 8069.
8. Lean, H.H., 2025, Energy security, *Elgar Encyclopedia of Energy Economics*
9. Xianglin Li, Amir Faghri, Chao Xu, 2010, Water management of the DMFC passively fed with a high-concentration methanol solution, *ELSEVIER, international journal of hydrogen energy*, n 35, s 8690-8698.
10. Zhijie Li, Changhui Zhai, Xiaoxiao Zeng, Kui Shi, Xinbo Wu, Tianwei Ma, Yunliang Qi, 2025, Review of Pre-Ignition Research in Methanol Engines, *MDPI, Energies*, 18, 133, s 1-27.
11. Yan Liu, Junheng Liu, Qian Ji, Xintao Wang, Chengcheng Ao, 2025, Experimental study on performance and emission characteristics of non-road methanol/diesel dual-fuel engine with after-treatment system at full loads, *ELSEVIER, Journal of Environmental Management* 376 124486, s 1-11.
12. Simone Mucci, Alexander Mitsos, Dominik Bongartz, 2023, Cost-optimal Power-to-Methanol: Flexible operation or intermediate storage?, *Journal of Energy Storage*, Volume 72, Part E, 108614
13. R. Rinaldi, G. Lombardelli, M. Gatti, C. Visconti, M. Romano, 2023, Techno-economic analysis of a biogas-to-methanol process: Study of different process configurations and conditions, *Journal of Cleaner Production*, vol. 393, 136259
14. Salameh M.G., 2023, US energy security in the 21st century, *Petroleum Review*
15. S. Sollai, A Porcu, V. Tola, F. Ferrara, A. Pettinau, 2023, Renewable methanol production from green hydrogen and captured CO₂: A techno-economic assessment, *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 68, 102345

16. J. Vancoillie, J. Demuynck, L. Sileghem, M. Van De Ginste, S. Verhelst, L. Brabant, L. Van Hoorebeke, 2013, The potential of methanol as a fuel for flex-fuel and dedicated spark-ignition engines, ELSEVIER, Applied Energy, n 102, s 140-149.
17. Fang-Xi Xie, Xiao-Ping Li, Xin-Chao Wang, Yan Su, Wei Hong, 2013, Research on using EGR and ignition timing to control load of a spark-ignition engine fueled with methanol, ELSEVIER, Applied Thermal Engineering, nr 50, s 1084-1091.
18. Younus, H.A., Al Hajri, R., Ahmad, N. et al., 2025, Green hydrogen production and deployment: opportunities and challenges. Discov. Electrochem. 2, 32.
19. Bo Yuan, Huali Zhao, Yuhan Huang, Miao Zhang, Zhihui Song, Yuan Shen, Xiaobei Cheng, Zhaowen Wang, 2025, Investigation on cold start issues of methanol engines and its improvement from the perspective of droplet evaporation, ELSEVIER, Fuel 380 133249, s 1-12.
20. Xiumin Yu, Decheng Li, Song Yang, Ping Sun, Zezhou Guo, Hang Yang, Yinan Li, Tianqi Wang, 2020, Effects of hydrogen direct injection on combustion and emission characteristics of a hydrogen/Acetone-Butanol-Ethanol dual-fuel spark ignition engine under lean-burn conditions, ELSEVIER, international journal of hydrogen energy, n 45, s 34193- 34203.
21. Wen Zhang, Chengyan Wen, Xinghua Zhang, Lungang Chen, Qi Zhang, and Longlong Ma, A Review of Green Methanol Production: Technologies, Economic Evaluation, and Carbon Emission Analysis, 2025, Energy & Fuels 2025 39 (39), 18733-18750
22. Jizhen Zhu, Sixu Wang, Mohsin Raza, Yuan Feng, Jing Li, Yebing Mao, Liang Yu, Yong Qian, Xingcai Lu, 2021, Autoignition behavior of methanol/diesel mixtures: Experiments and kinetic modelling, ELSEVIER, Combustion and Flame, n 228, s 1-12.

Opracowania i raporty z badań

1. Kylee Harris, R. Gary Grim, Ling Tao, 2021, Innovation Outlook Renewable Methanol, International Renewable Energy Agency, ISBN 978-92-9260-320-5.
2. Philipp Moser, 2025, Hy2Market GW-scale techno-economic methanol analysis, European Union, ver. 1.
3. Net Zero Technology Centre (2023), "SGT-A20 bio-methanol demonstration test summary report", dostępne online: <https://www.netzerotc.com/wp-content/uploads/2023/09/1130-REP-047-R1-SGT-A20-Bio-methanol-demonstration-test-summary-report.pdf> [dostęp: 26.03.2026].

Komunikaty Internetowe

1. Methanol Institute, Renewable Methanol [komunikat internetowy] <https://methanol.org/renewable/> [dostęp: 26.03.2026].

GREEN METHANOL AS AN ALTERNATIVE FUEL FOR POWERING ELECTRICAL AND THERMAL ENERGY GENERATION SYSTEMS

Abstract

The article analyzes the potential of green methanol as an alternative fuel aimed at supporting energy transition and improving the country's energy security. It presents the possibilities of utilizing methanol in energy systems such as internal combustion engines, gas turbines, and fuel cells. Furthermore, paths for producing biomethanol and e-methanol are indicated, and the results of a simplified cost analysis for biomethanol production from biogas are presented. The main cost of biomethanol production is the generation of green hydrogen in an electrolyzer; therefore, the analysis compares two electrolyzer technologies: PEM and SOEC. The results demonstrate that the use of solid oxide electrolyzers, which allow for the utilization of waste heat, enables a significant reduction in the costs of hydrogen production and, consequently, biomethanol production. This confirms the validity of developing Power-to-Methanol technologies in the near future.

Keywords: green methanol, alternative fuels, decarbonization, energy source diversification

Piotr MAKA*

Monika PAWLAK**

Sławomir STEPIEŃ**

OPTIMALIZACJA ZUŻYCIA ENERGII W POLICYJNYCH SYSTEMACH BEZZAŁOGOWYCH W KONTEKŚCIE STEROWANIA I PROWADZENIA DZIAŁAŃ OPERACYJNO-ROZPOZNAWCZYCH

W pracy przedstawiono zagadnienie optymalizacji zużycia energii w policyjnych systemach bezzałogowych w kontekście sterowania oraz realizacji działań operacyjno-rozpoznawczych. Zaprezentowano model dynamiczny czterowirnikowego statku powietrznego oraz porównano dwa podejścia do sterowania: klasyczny regulator proporcjonalno – różniczkowy (PD) oraz metodę optymalnego sterowania opartą na równaniu Riccatiego zależnym od stanu (SDRE). Przeprowadzone symulacje wykazały, że zastosowanie SDRE pozwala uzyskać bardziej płynne trajektorie lotu oraz zmniejszenie zużycia energii przez silniki. Dodatkowo omówiono praktyczne aspekty wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych w działaniach Policji, ze szczególnym uwzględnieniem zarządzania energią w warunkach konieczności utrzymania ciągłej gotowości operacyjnej. Wskazano na istotne wyzwania związane z eksploatacją akumulatorów oraz potrzebę opracowania efektywnych strategii ich użytkowania.

Słowa kluczowe: działania operacyjno-rozpoznawcze, modelowanie dronów, sterowanie optymalne, optymalizacja działań policyjnych

* Centrum Kształcenia i Technologii Bezzałogowych Statków Powietrznych, Politechnika Poznańska, ul. Jacka Rychlewskiego 1, 61-131 Poznań.

** Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań.

1. WPROWADZENIE

Wsparcie zaawansowanych technologii zrobotyzowanych systemów latających stanowi istotny element służby policyjnej. Zarówno w działaniach operacyjnych, jak i rozpoznawczych, wykorzystanie nowoczesnych rozwiązań technicznych oraz oprogramowania jest dziś nieodzowne w codziennej pracy [2].

Zrobotyzowane technologie wykorzystywane w policji stanowią jeden z najbardziej zaawansowanych obszarów wsparcia działań operacyjnych. Oprócz zdalnie sterowanych UAV, wdrażane są również bardziej zaawansowane wersje statków powietrznych wykorzystujące systemy akwizycji obrazu, dźwięku lub skażenia terenu, które mogą wykonywać programowalne i autonomiczne misje. Obserwuje się także dynamiczny rozwój rozwiązań interwencyjnych opartych na bezzałogowych systemach latających. Jednostki te, wyposażone w elementy sztucznej inteligencji, mogą realizować zadania związane z obsługą zgłoszeń oraz wspierać funkcjonariuszy w działaniach terenowych [2].

Dla przykładu, 13 listopada 2024 r. [3] burmistrz Nowego Jorku Eric Adams oraz komisarz policji NYC Tom Donlon ogłosili uruchomienie programu Drone as First Responder (DFR). Inicjatywa funkcjonuje obecnie w pięciu jednostkach operacyjnych, z których każda dysponuje dwoma bezzałogowymi statkami powietrznymi, rozmieszczonymi w trzech z pięciu dzielnic miasta. Misje obejmują poszukiwania osób zaginionych, alerty z systemu wykrywania strażów ShotSpotter, rabunki/poważne kradzieże „i inne trwające przestępstwa w razie potrzeby”. Drony będą wykorzystywane do wsparcia działań policji poprzez dostarczanie dźwięku i obrazu do telefonów komórkowych funkcjonariuszy i przełożonych, jak również do zbierania dowodów o wysokiej rozdzielczości na potrzeby śledztwa i dokumentacji, oceny potencjalnie niebezpiecznych incydentów z materiałami niebezpiecznymi bez narażania ratowników na ryzyko i reagowanie na klęski żywiołowe, takie jak huragany, powódzie i trzęsienia ziemi.

Z kolei Brytyjska Policja również wykorzystuje bezzałogowe statki powietrzne w koncepcji pierwszego ratownika DFR [4]. Jest to sieć dronów rozmieszczonych w obszarach miejskich, zapewniających całodobową szybką reakcję i tzw. „oczy w powietrzu” w przypadku incydentów zgłaszanych służbom ratunkowym. Wykorzystując najnowszą technologię, jednostki te będą zaopatrzone w skrzynki startowe i lądowania na dachach wybranych budynków, oczekując na sygnał startowy z policyjnego centrum dowodzenia. Po podjęciu decyzji o ich użyciu, następuje zdalne uruchomienie, a przelot na miejsce zdarzenia zajmuje mniej niż dwie minuty. W Southampton jedna z takich platform latających jest umieszczona na dachu, skąd może być rozmieszczana z centrum dowodzenia, aby przekazać obraz zdarzeń w czasie rzeczywistym. Rozwiązanie to umożliwia nie tylko efektywne rozmieszczenie zasobów policyjnych, ale także śledzenie podejrzanych opuszczających miejsce zdarzenia i nagrywanie materiału do celów dowodowych.



Rys. 1. Centrum DFR w Southampton

Również w Polskiej Policji prowadzone są prace mające na celu wykorzystanie nowoczesnych rozwiązań w tym z zastosowaniem bezzałogowych statków powietrznych.

Drony i roboty są dzisiaj wykorzystywane w wielu policyjnych zadaniach:

- pomagają w poszukiwaniu osób zaginionych i akcjach ratowniczych, - zapewniają dodatkowe oświetlenie w nocy lub w innych warunkach ograniczonej widoczności, m.in. podczas prowadzenia czynności procesowych, poszukiwaniach osób zaginionych czy w sytuacjach kryzysowych,
- wspomagają proces gromadzenia materiału dowodowego miejsc przestępstw, katastrof, klęsk żywiołowych,
- pomagają w procesie rozpoznania w zakresie grup przestępczych i ich nielegalnej działalności.
- wykorzystywane są w rekonstrukcji wypadków drogowych poprzez wykonywanie zdjęć lotniczych, monitorują zagrożenia w ruchu drogowym i rejestrują naruszenia przepisów przez kierowców oraz innych uczestników ruchu drogowego,
- umożliwiają sprawne zabezpieczenie imprez masowych,
- wspierają działania podczas akcji kontrterrorystycznych, zatrzymywaniu niebezpiecznych przestępców czy neutralizacji niebezpiecznych przedmiotów.

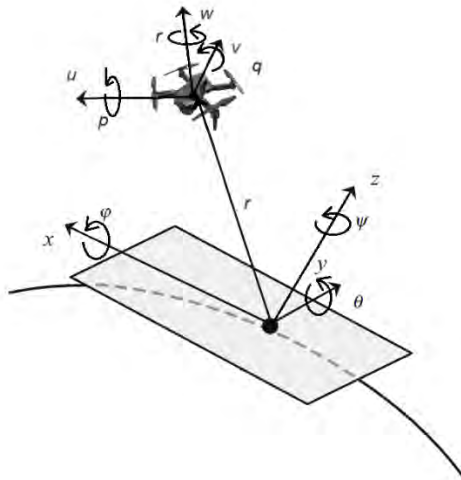
W Komendzie Wojewódzkiej Policji w Poznaniu wspólnie z Politechniką Poznańską prowadzone są opracowania oraz analizy w zakresie możliwości wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych startujących ze stacji dokujących rozmieszczonych w różnych miejscach, które mogłyby być pomocnym narzędziem wspierającym ustawowe zadania policji, szczególnie podczas pilnych zgłoszeń w zakresie zagrożeń życia i zdrowia oraz mienia wielkiej wartości. Analizowane są systemy stosowane już w innych państwach m.in. w Stanach Zjednoczonych czy Norwegii.

Dynamiczny rozwój technologii umożliwia projektowanie zaawansowanych rozwiązań, mogących istotnie podnieść poziom bezpieczeństwa na danym obszarze. Największym wyzwaniem dla jednostek policyjnych wdrażających autonomiczne systemy lotów bezzałogowych statków powietrznych pozostaje zapewnienie bezpieczeństwa w przestrzeni powietrznej, a także spełnienie wymagań prawnych i proceduralnych towarzyszących niemal każdemu wdrożeniu.

2. MODEL UAV I STEROWANIE

2.1. Model UAV

Do opisu kinematyki i dynamiki czterowirnikowego statku powietrznego, tzw. quadrokoptera, wykorzystano współrzędne globalne związane ze współrzędnymi obserwatora, czy operatora oraz współrzędne lokalne związane z bryłą platformy bezzałogowej [5,11]. Współrzędne globalne opisują globalną pozycję drona, natomiast lokalne jego prędkości, stąd można powiedzieć, że opracowany model jest modelem GP – GV (ang. Global Position – Local Velocity). Jednakże uwzględnienie związków kinematycznych pomiędzy układem globalnym oraz lokalnym daje możliwość zdefiniowania modelu GP – GV (ang. Global Position – Global Velocity), co również jest przedmiotem pracy. Na Rys. 1 pokazano położenie statku w opisywanych współrzędnych.



Rys. 2. Definicja położenia drona w układzie GP-LV

Zgodnie z powyższym rysunkiem, wektor położenia liniowego czterowirnikowca w układzie inercyjnym (globalnym) można opisać wektorem pozycji:

$$\xi_1 = [x \ y \ z]^T, \quad (1)$$

z kolei jego orientację w układzie globalnym przy pomocy kątów Eulera, składowych wektora orientacji:

$$\xi_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T. \quad (2)$$

Natomiast prędkość liniowa w układzie lokalnym drona wyrażona jest przy pomocy wektora prędkości liniowej:

$$\mathbf{v}_1 = [u \ v \ w]^T, \quad (3)$$

a jego prędkość obrotowa wyrażona jest przy pomocy wektora prędkości obrotowej:

$$\mathbf{v}_2 = [p \ q \ r]^T. \quad (4)$$

Przeliczenie kinematyki z układu lokalnego do globalnego wiąże się z transformacją układu lokalnego wyrażoną przez sekwencje obrotów o kąty Eulera (ϕ, θ, ψ) wokół osi (x, y, z) . Wówczas związek pomiędzy prędkościami liniowymi w obu układach jest następujący:

$$\dot{\xi}_1 = \mathbf{R}_{zyx}(\xi_1)\mathbf{v}_1. \quad (5)$$

Podobnie związek pomiędzy prędkościami obrotowymi w obu układach jest następujący:

$$\dot{\xi}_2 = \mathbf{T}(\xi_1)\mathbf{v}_2. \quad (6)$$

Na podstawie określonych wektorów rozpatrywanych w modelu układów współrzędnych można określić jego stan dla konfiguracji GP – LV o postaci:

$$\mathbf{x} = [\xi_1^T \ \xi_2^T \ \mathbf{v}_1^T \ \mathbf{v}_2^T]^T = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi \ u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (7)$$

Równania dynamiki quadrokoptera można wyprowadzić na podstawie następujących równań Newtona:

- ruchu postępowego w układzie lokalnym:

$$\mathbf{F} = m\dot{\mathbf{v}}_1 + m(\mathbf{v}_2 \times \mathbf{v}_1), \quad (8)$$

- ruchu obrotowego w układzie lokalnym:

$$\mathbf{T} = \mathbf{I}\dot{\mathbf{v}}_2 + \mathbf{v}_2 \times \mathbf{I}\mathbf{v}_2. \quad (9)$$

Finalnie wykorzystując związki (5) – (6) oraz równania dynamiki (8) – (9), model czterowirnikowego statku powietrznego w sprzężonej formie dla zmiennych globalnych i lokalnych można zapisać[5]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \\ \dot{\mathbf{v}}_1 \\ \dot{\mathbf{v}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{zyx}(\xi_1)\mathbf{v}_1 \\ \mathbf{T}(\xi_1)\mathbf{v}_2 \\ \mathbf{C}_1(\mathbf{v}_2)\mathbf{v}_1 - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}\mathbf{R}_{zyx}(\xi_1)\mathbf{v}_1 + \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{B}_1\mathbf{u}_1 - \mathbf{G}(\xi_2)] \\ \mathbf{I}^{-1}\mathbf{C}_2(\mathbf{v}_2)\mathbf{v}_1 + \mathbf{I}^{-1}\mathbf{B}_2\mathbf{u}_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Wyrażenie związane ze sterowaniem siłą ciągu \mathbf{u}_1 zawiera sprzężenie grawitacyjne, co można uprościć podstawiając w modelu sterowanie zastępcze $\bar{\mathbf{u}}_1 = \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1 - \mathbf{G}(\xi_2)$, co daje możliwość odseparowania sterowania:

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \\ \dot{\mathbf{v}}_1 \\ \dot{\mathbf{v}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{zyx}(\xi_1) \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{T}(\xi_2) \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{C}_1(\mathbf{v}_2) \mathbf{v}_1 - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{D} \mathbf{R}_{zyx}(\xi_1) \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{I}^{-1} \mathbf{C}_2(\mathbf{v}_2) \mathbf{v}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}^{-1} \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{u}}_1 \\ \mathbf{u}_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

gdzie:

$$\mathbf{R}_{zyx}(\xi_1) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix},$$

– macierz opisująca zależność pomiędzy prędkościami liniowymi w obu układach,

$$\mathbf{T}(\xi_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} - \text{macierz opisująca zależność pomiędzy}$$

prędkościami obrotowymi w obu układach,

$$\mathbf{C}_1(\mathbf{v}_2) = - \begin{bmatrix} 0 & r & -q \\ -r & 0 & p \\ q & -p & 0 \end{bmatrix} - \text{macierz zależna od prędkości obrotowych,}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} - \text{macierz masy,}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_x & 0 & 0 \\ 0 & d_y & 0 \\ 0 & 0 & d_z \end{bmatrix} - \text{macierz współczynników oporu powietrza,}$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} - \text{macierz bezwładności symetrycznego statku,}$$

$\mathbf{u}_1 = F_T$ - sterowanie siłą ciągu,

$$\mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} T_\phi \\ T_\theta \\ T_\psi \end{bmatrix} - \text{wektor momentów sterujących}$$

$$\mathbf{C}_2(\mathbf{v}_2) = \begin{bmatrix} 0 & -(I_z - I_y)r & 0 \\ 0 & 0 & -(I_z - I_x)p \\ -(I_y - I_x)r & 0 & 0 \end{bmatrix} - \text{macierz zależna od bezwładności}$$

i prędkości obrotowych,

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{jednostkowa macierz sterowań.}$$

2.2. Sterowanie optymalne z minimalną energią

Problem sterowania z minimalną energią ze skończonym horyzontem czasowym polega na znalezieniu takiego sterowania, które minimalizuje następującą funkcję celu w skończonym czasie t_f [6,7,9]:

$$J(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(t_f) \mathbf{G} \mathbf{x}(t_f) + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (\mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt, \quad (12)$$

przy ograniczeniu na dynamikę nieliniowego układu afinicznego w postaci sparametryzowanej (SDC):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x})\mathbf{u}. \quad (13)$$

Macierz współczynników \mathbf{G} jest macierzą symetryczną, półododatnio określoną, \mathbf{R} jest macierzą symetryczną, dodatnio określoną.

Jeśli para $\{\mathbf{A}(\mathbf{x}), \mathbf{B}(\mathbf{x})\}$ stanowi stabilną i sterowalną parametryzację układu nieliniowego (13) i gdy wykorzystamy teorię Hamiltonianu w rachunku Hamiltona – Jacobiego – Bellmana wówczas otrzymamy następujące prawo sterowania optymalnego:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{K}(\mathbf{x}) \mathbf{x}, \quad (14)$$

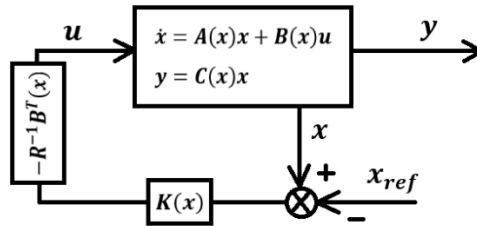
gdzie $\mathbf{K}(\mathbf{x})$ jest macierzą zależnych od stanu współczynników. Prawo sterowania można zdefiniować dla określonego stanu referencyjnego \mathbf{x}_{ref} uzyskując $\mathbf{u} = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{K}(\mathbf{x})(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{ref})$, wówczas układ sterowania można przedstawić w postaci następującego schematu jak na poniższym rysunku.

Macierz sprzężenia zwrotnego $\mathbf{K}(\mathbf{x})$ wyznaczamy na podstawie równania Riccatego różniczkowego[8,10]:

$$\dot{\mathbf{K}}(\mathbf{x}) + \mathbf{K}(\mathbf{x})\mathbf{A}(\mathbf{x}) + \mathbf{A}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}(\mathbf{x}) - \mathbf{K}(\mathbf{x})\mathbf{B}(\mathbf{x})\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T(\mathbf{x})\mathbf{K}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \quad (15)$$

z warunkiem końcowym

$$\mathbf{K}(\mathbf{x}_f) = \mathbf{G}. \quad (16)$$



Rys. 3. Schemat układu regulacji SDRE

2.3. Przykłady optymalizacji sterowania

Sterowanie napędem wielowirnikowych bezzałogowych statków powietrznych wpływa zarówno na stabilność lotu, jak i efektywność energetyczną całego systemu. W praktyce inżynierskiej szeroko stosowane są klasyczne regulatory, takie jak PD, które dzięki swojej prostocie i niskim wymaganiom obliczeniowym znajdują zastosowanie w wielu implementacjach czasu rzeczywistego. Jednakże podejścia te nie uwzględniają w sposób jawny kryteriów optymalizacyjnych, w szczególności związanych z minimalizacją zużycia energii.

Alternatywę stanowią metody optymalnego sterowania, w tym podejście oparte na równaniu Riccatiego zależnym od stanu - SDRE, które umożliwia uwzględnienie nieliniowej dynamiki układu oraz bezpośrednio wprowadzenie kryterium kosztu związanego z energią sterowania. W rezultacie możliwe jest uzyskanie sterowania bardziej efektywnego z punktu widzenia zużycia energii, przy zachowaniu wymaganych właściwości dynamicznych.

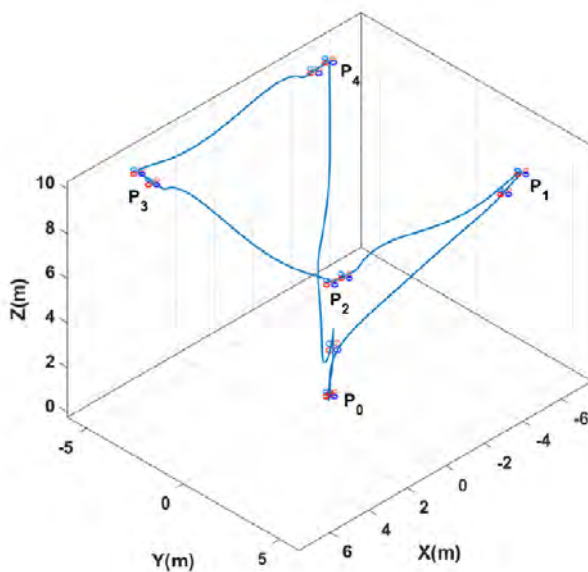
Planer trajektorii lotu odpowiada za generowanie sekwencji punktów odniesienia, do których dron ma sukcesywnie dolatywać. W rozpatrywanym przypadku zaprogramowano łącznie pięć celów przestrzennych w trójwymiarowej przestrzeni, zgodnie z poniższą tabelą:

Tabela 1

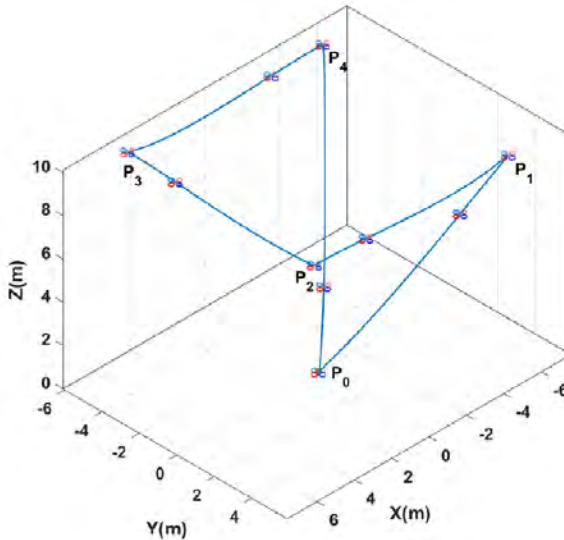
Plan trajektorii lotu

punkt docelowy	x[m]	y[m]	z[m]	czas osiągnięcia
1	-5	5	10	10
2	5	5	10	20
3	5	-5	10	30
4	-5	-5	10	40
5	0	0	0	50

Poniżej zaprezentowano wyniki symulacji w programie Matlab Simulink obrazujące położenie i zachowanie wielowirnikowca podczas przelotu przez kolejne punkty zadane. Na rys. 4 i rys. 5 przedstawiono przebiegi trajektorii uzyskane przy zastosowaniu dwóch różnych podejść regulacyjnych: klasycznego regulatora PD oraz regulatora SDRE.



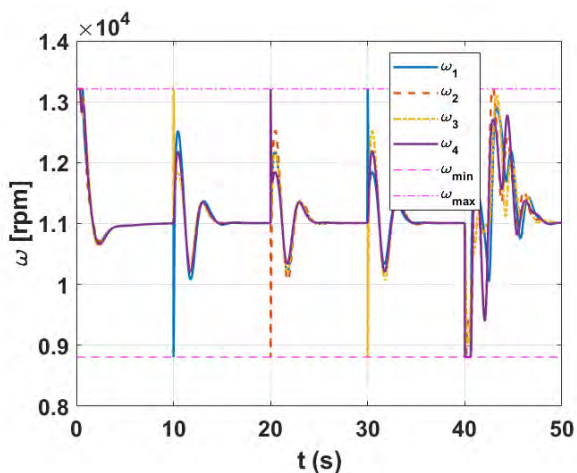
Rys. 4. Wizualizacja trajektorii lotu dla systemu z regulatorem PD



Rys. 5. Wizualizacja trajektorii lotu dla systemu z regulatorem SDRE

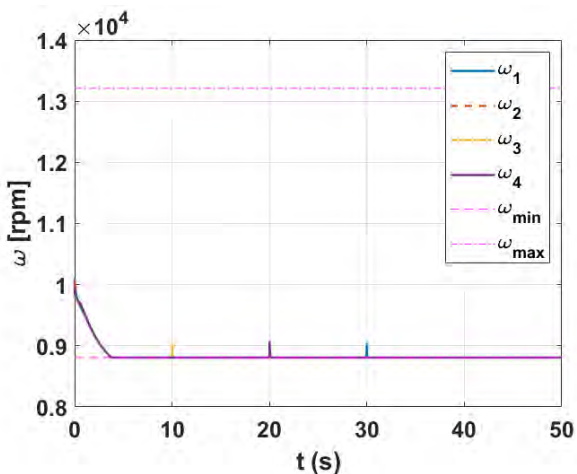
Punkt $[0, 0, 0]$ jest pozycją początkową, natomiast oznaczenia (P1-P5) wskazują na kolejne punkty docelowe. Niebieska linia reprezentuje automatycznie wyznaczaną ścieżkę przelotu, a interwałowo dodawane grafiki ramion BSP pozwalają śledzić jego orientację w czasie. W modelu przyjęto konstrukcję drona typu „+”, a rzuty ramion oraz rotacja wirników uwzględniają rzeczywiste przekształcenia kątowe wynikające ze zmiennych ϕ , θ oraz ψ .

Na podstawie porównania dwóch wizualizacji trajektorii, jednej uzyskanej za pomocą regulatora PD, a drugiej przy zastosowaniu SDRE, można zauważyć wyraźne różnice w sposobie, w jaki dron realizuje przelot między kolejnymi punktami zadanymi. W przypadku regulatora PD trajektoria wykazuje charakterystyczne ostre zakręty i miejscami nieregularne odchylenia od linii prostej między punktami, co świadczy o bardziej sztywnym i mniej adaptacyjnym działaniu sterowania. Dron w takim przypadku reaguje na błędy szybko, co skutkuje gwałtowniejszymi manewrami i bardziej złożonymi zmianami orientacji. Z kolei trajektoria uzyskana przy zastosowaniu SDRE jest znacznie gładzsza i bardziej opływowa – przeloty między kolejnymi punktami odbywają się w sposób łagodny, a krzywizny lotu wskazują na to, że sterowanie aktywnie i inteligentnie uwzględnia zarówno stan układu, jak i jego nieliniowości. W rezultacie dron porusza się bardziej naturalnie i stabilnie, z mniejszymi przeciążeniami oraz mniej agresywnymi korektami położenia i orientacji.



Rys. 6. Przebieg czasowy prędkości obrotowych osiągniętych przez silniki wraz z nałożonymi ograniczeniami - PD

Rys.6 przedstawia przebiegi prędkości kątowych poszczególnych silników ω_1 – ω_4 . Wykazują one znaczne fluktuacje, kilkakrotnie osiągając dolne ograniczenie 8800 rpm. W momentach przejściowych obserwuje się wyraźne skoki prędkości, sięgające nawet wartości $\omega \approx 13200$ rpm. Przebiegi te charakteryzują się dużą zmiennością i są podatne na przekroczenie dopuszczalnych granic pracy silników. Takie zachowanie świadczy o agresywnym charakterze sterowania, który prowadzi do dużych przeciążeń napędu oraz zwiększonego zużycia energii.



Rys. 7. Przebieg czasowy prędkości obrotowych osiągniętych przez silniki wraz z nałożonymi ograniczeniami – SDRE

Z kolei na rys.7 zauważalne jest, że prędkości silników po krótkim czasie ustalają się blisko wartości minimalnej, z niewielkimi odstępstwami od tej wartości przy zadawanych manewrach. Sygnały są wyraźnie wygładzone, a zmiany prędkości zachodzą w sposób ciągły, bez gwałtownych skoków. Co istotne, nie dochodzi do naruszenia nałożonych ograniczeń pracy silników. Zatem zastosowanie regulatora SDRE skutkuje bezpieczniejszą pracą silników, minimalizując ryzyko przeciążeń wynikających z nagłych skoków prędkości.

Różnice pomiędzy analizowanymi metodami wynikają bezpośrednio z ich natury. Regulator PD działa lokalnie i nie uwzględnia globalnego kryterium optymalizacji, przez co generuje bardziej impulsywne sterowanie. Natomiast SDRE, jako metoda optymalna, minimalizuje funkcję kosztu, co przekłada się na bardziej ekonomiczne i płynne sterowanie.

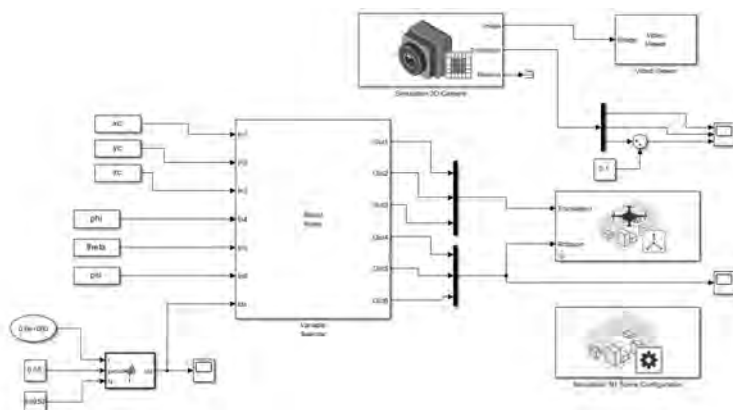
3. WIRTUALNE ŚRODOWISKA PROJEKTOWANIA MISJI

Jednym z najczęściej wykorzystywanych środowisk jest UAV Scenario Designer, będący narzędziem pakietu Matlab firmy MathWorks [1]. Umożliwia on tworzenie scenariuszy symulujących loty bezałogowych statków powietrznych (UAV) w środowisku miejskim, np. pomiędzy budynkami. Dodatkowo pozwala na wizualizację przebiegu lotu oraz generowanie symulowanych trajektorii.

W ramach scenariusza można definiować przeszkody w obszarze roboczym, zadawać trajektorie w globalnych układach współrzędnych oraz przeprowadzać transformacje między układami odniesienia. Narzędzie umożliwia wizualizację tych danych w kontekście całego środowiska symulacyjnego.

Po załadowaniu danych lotu do obszaru roboczego oraz utworzeniu modelu quadrokoptera, z wykorzystaniem układu odniesienia NED możliwe jest określenie jego położenia początkowego i orientacji. Na podstawie danych trajektorii możliwa jest ich wizualizacja w środowisku symulacyjnym.

Na Rys. 8 przedstawiono przykładowy schemat systemu wizualizacji lotu wielowirnikowca w środowisku Matlab–Simulink po uprzednim wczytaniu przebiegów wartości jego wektora stanu.



Rys. 8. Schemat układu wizualizacji lotu

Poniższy rysunek z kolei prezentuje przykładową wizualizację lotu w środowisku 3D. Jest ono generowane przy użyciu narzędzia Unreal Engine firmy Epic Games. Blok wizualizacji korzysta z danych wejściowych opisujących położenie oraz orientację bezzałogowego statku powietrznego (przechył, pochylenie, odchylenie) w trakcie symulacji.



Rys. 9. Wizualizacja lotu quadrokoptera

4. DZIAŁANIA POLICYJNE I OPTYMALIZACJA

Pierwsze bezzałogowe statki powietrzne w polskiej Policji pojawiły około 2012 roku. Początkowo były to pojedyncze egzemplarze, wykorzystywane sporadycznie,

w nielicznych jednostkach. W kolejnych latach nastąpił dynamiczny rozwój technologiczny, który bezpośrednio wpłynął na wzrost zainteresowania systemami bezzałogowymi. Pierwsze systemowe regulacje w Policji opracowano i wdrożono w 2019 roku. Od tego czasu nastąpił wyraźny wzrost zastosowania bezzałogowych statków powietrznych.

Obecnie są one wykorzystywane przede wszystkim w działaniach porządkowych, m.in. podczas zabezpieczania imprez masowych, monitorowania szlaków komunikacyjnych, akcji poszukiwawczych, dokumentowania miejsc zdarzeń (przestępstw, wypadków i katastrof), rozpoznania obszarów niebezpiecznych, a także w działaniach kontr-terrorystycznych oraz operacyjno-rozpoznawczych.

Początkowe konstrukcje bezzałogowych statków powietrznych stosowano głównie do zadań obserwacyjnych. Współczesne systemy BSP wyposażone są w zaawansowane urządzenia, takie jak specjalistyczne czujniki, sensory, kamery wysokiej rozdzielczości z teleobiektywem czy systemy termowizyjne. W konsekwencji ich efektywna eksploatacja wymaga nie tylko umiejętności pilotażu, lecz również posiadania specjalistycznej wiedzy obejmującej obsługę zainstalowanych systemów, wykorzystanie dedykowanego oprogramowania, a także przetwarzanie, analizę i interpretację pozyskiwanych danych.

Istotnym aspektem jest również właściwa organizacja eksploatacji tych systemów. Obejmuje ona w szczególności opracowanie taktyki prowadzenia operacji z użyciem dronów, zapewnienie skutecznej koordynacji pomiędzy uczestnikami działań, utrzymanie sprzętu w pełnej sprawności technicznej oraz zapewnienie stałej gotowości operacyjnej. Kluczowym elementem tego systemu jest również optymalne zarządzanie energią.

4.1. Poszukiwanie osób zaginionych

Jednym z zadań, w których bezzałogowe statki powietrzne są najczęściej wykorzystywane przez Policję, jest poszukiwanie osób zaginionych. Do tego typu działań stosuje się głównie wielowirnikowce wyposażone w kamery RGB o wysokiej rozdzielczości z teleobiektywem oraz kamery termowizyjne. W określonych warunkach pomocne mogą być również systemy noktowizyjne, a w niektórych przypadkach także sensory multispektralne. Podczas działań nocnych skutecznym rozwiązaniem jest wykorzystanie dodatkowych platform wyposażonych w oświetlenie oraz systemy nagłośnienia.

Coraz częściej w kontekście działań poszukiwawczych rozważa się wykorzystanie bezzałogowych systemów FPV, szczególnie przydatnych w terenach trudno dostępnych, takich jak zarośnięte obszary bagienne czy lasy. Tego typu platformy latające umożliwiają obserwację z niskiego pułapu oraz precyzyjny lot pomiędzy przeszkodami, takimi jak drzewa czy gęsta roślinność. Modelowym rozwiązaniem w ta-

kim środowisku jest połączenie lotów obserwacyjnych realizowanych przez wielowirnikowce z wykorzystaniem systemów FPV, zapewniających przekaz obrazu z wnętrza lasu oraz innych obszarów niewidocznych z góry.

4.2. Zabezpieczenie imprez masowych oraz kontrola bezpieczeństwa w ruchu drogowym

Bezzałogowe statki powietrzne są powszechnie wykorzystywane podczas zabezpieczania imprez masowych oraz kontroli bezpieczeństwa w ruchu drogowym. W tego typu działaniach stosuje się najczęściej platformy o masie startowej do 4 kg, wyposażone w kamery dzienne RGB o wysokiej jakości optyce i teleobiektywach.

Operacje prowadzone są głównie w obszarach miejskich, w pobliżu autostrad oraz na terenach pozamiejskich, zwłaszcza podczas organizacji koncertów i innych zgromadzeń. Tego typu działania realizowane są z udziałem obserwatora, utrzymującego stały kontakt ze stanowiskiem dowodzenia oraz pilotem. Do jego podstawowych zadań należy kontrola przestrzeni powietrznej oraz wskazywanie obszarów rejestracji obrazu. Wymaga to od operatorów przede wszystkim umiejętności właściwego rejestrowania obrazu, wykonywania dokumentacji fotograficznej oraz utrwalania zdarzeń związanych z przestępstwami i wykroczeniami.

4.3. Dokumentowanie miejsc katastrof i wypadków komunikacyjnych

W zadaniach dokumentacyjnych mogą być wykorzystywane bezzałogowe statki powietrzne z kamerami RGB wysokiej rozdzielczości a teleobiektywami, a także drony wyposażone w skaner LiDAR. Dane pozyskiwane z tych systemów mogą być wykorzystywane do dokumentowania miejsc wypadków, katastrof oraz klęsk żywiołowych, z możliwością ich dalszego przetwarzania w formie 3D. Rozwiązanie to istotnie usprawnia proces zbierania, analizy i przeglądu materiału dowodowego. W przypadku zastosowania skanerów LiDAR niezbędne jest specjalistyczne przeszkolenie personelu w zakresie przetwarzania i interpretacji zgromadzonych danych. Obecnie systemy te nie są jeszcze wykorzystywane na bezzałogowych statkach powietrznych Policji, jednak ich wdrożenie jest rozważane.

4.4. Drony w służbie kontrterrorystycznej Policji oraz wykorzystywane w czynnościach operacyjno-rozpoznawczych

W działaniach operacyjno-rozpoznawczych, w tym podczas zatrzymywania szczególnie niebezpiecznych sprawców przestępstw, również przez jednostki kontrterrorystyczne Policji, wykorzystywane są lekkie bezzałogowe statki powietrzne

o niskiej emisji hałasu, głównie o masie startowej do 250 g, a także platformy wyposażone w kamery RGB o wysokiej rozdzielczości z teleobiektywami, umożliwiające obserwację z większych odległości.

Istotnym kierunkiem rozwoju, mającym bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo funkcjonariuszy, jest wykorzystanie precyzyjnych dronów FPV do realizacji zadań rozpoznawczych. Obecnie rozwiązania tej klasy nie znajdują się jeszcze na wyposażeniu Policji, co wynika przede wszystkim z niejednoznacznych regulacji prawnych.

Uwzględniając jednak przyszłe zapotrzebowanie kadrowe, prowadzone są już szkolenia w zakresie obsługi i wykorzystania systemów FPV. Pierwsze takie szkolenie przeprowadzone zostało dla grupy 50-ciu policjantów z Wielkopolski przez Centrum Kształcenia i Technologii Bezzałogowych Statków Powietrznych Politechniki Poznańskiej.

4.5. Loty automatyczne bezzałogowych statków powietrznych sterowane i kordynowane z centrum dowodzenia

Jednym z przyszłościowych kierunków rozwoju systemów bezzałogowych jest budowa systemu opartego na lotach automatycznych, startujących w rozmieszczonych w różnych miejscach stacji dokujących. W wielu jednostkach policji m.in. w Stanach Zjednoczonych i Wielkiej Brytanii takie systemy już zostały wdrożone. Wykorzystywane są m.in. do patrolowania określonych obszarów oraz monitorowania przebiegu zdarzeń, a także do śledzenia osób i pojazdów. Istotną funkcją systemów opartych na stacjach dokujących jest możliwość ich niezwłocznego skierowania w rejon popełnienia przestępstwa, miejsca wypadku lub katastrofy, co znacząco zwiększa efektywność działań policyjnych.

Systemy te funkcjonują najczęściej w ramach zintegrowanej infrastruktury, umożliwiającej bieżące przekazywanie obrazu oraz danych do wskazanych odbiorców. W Komendzie Wojewódzkiej Policji w Poznaniu trwają prace koncepcyjne nad możliwością pilotażowego wdrożenia takiego systemu.

4.6. Optymalizacja działań przy wykonywaniu operacji z użyciem BSP w Policji

Powyżej przedstawiono aktualne oraz potencjalne zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w Policji. Różnorodność dostępnych rozwiązań technicznych oraz rosnący zakres realizowanych zadań wymagają nie tylko odpowiedniego doboru i wyszkolenia kadry, lecz również opracowania procedur operacyjnych zapewniających ich bezpieczną i efektywną realizację.

Początkowe konstrukcje wymagały od operatora głównie umiejętności sterowania i obsługi. Współczesne systemy umożliwiają jednoczesne pozyskiwanie znacz-

nie większej ilości danych, co generuje zwiększone zapotrzebowanie na moc obliczeniową oraz czas pracy wyspecjalizowanego personelu. Z tego względu kluczowe staje się odpowiednie planowanie tras przelotów, tak aby uniknąć redundancji danych, a także właściwy dobór sensorów i urządzeń pomiarowych do specyfiki realizowanych zadań.

W kontekście powszechnego wykorzystania tych systemów szczególnego znaczenia nabiera zarządzanie energią, obejmujące zarówno platformy latające, jak i zainstalowane na nich urządzenia. Specyfika działań Policji sprawia, że w wielu przypadkach nie jest możliwe wcześniejsze określenie momentu ich użycia, zwłaszcza podczas działań interwencyjnych, takich jak poszukiwanie osób zaginionych, operacje kontrterrorystyczne czy czynności operacyjno-rozpoznawcze. W praktyce oznacza to konieczność utrzymywania dronów w stanie ciągłej gotowości operacyjnej.

Warunek ten implikuje potrzebę zapewnienia odpowiedniej liczby akumulatorów utrzymywanych w stanie pełnego naładowania, umożliwiających natychmiastowe użycie sprzętu. Jednocześnie należy uwzględnić właściwości eksploatacyjne akumulatorów litowo-jonowych, bądź litowo-polimerowych. Długotrwałe przechowywanie ich w stanie pełnego naładowania prowadzi do przyspieszonej degradacji chemicznej, skutkującej spadkiem pojemności oraz skróceniem żywotności.

W związku z tym ważne jest opracowanie takiego modelu zarządzania energią, który pozwoli pogodzić dwa przeciwstawne wymagania: utrzymanie wysokiej gotowości operacyjnej oraz ograniczenie procesów degradacyjnych akumulatorów. Osiągnięcie tego celu wymaga odpowiedniej organizacji procesu przechowywania pakietów energetycznych, w tym utrzymywania części z nich w stanie pełnego naładowania, przy jednoczesnym przechowywaniu pozostałych w stanie magazynowym (storage), optymalnym z punktu widzenia trwałości ogniw.

5. PODSUMOWANIE

Dynamiczny rozwój technologii bezzałogowych statków powietrznych powoduje ich coraz szersze wdrażanie w strukturach Policji, gdzie stają się istotnym elementem systemu zapewnienia bezpieczeństwa publicznego. Wykorzystanie BSP otwiera nowe możliwości operacyjne, w szczególności w zakresie obserwacji, poszukiwania osób zaginionych, monitorowania zdarzeń oraz zwiększenia bezpieczeństwa funkcjonariuszy w sytuacjach kryzysowych. Jednocześnie implementacja tych technologii wymaga kompleksowego podejścia, obejmującego zarówno aspekty techniczne, jak i organizacyjne.

W pracy przedstawiono model dynamiczny czterowirnikowego statku powietrznego oraz przeprowadzono analizę dwóch metod sterowania: klasycznego regulatora PD oraz podejścia optymalnego SDRE. Wyniki symulacji wskazują, że zastosowa-

nie metody SDRE pozwala na uzyskanie bardziej płynnych trajektorii lotu, ograniczenie gwałtownych zmian sygnałów sterujących oraz redukcję zużycia energii w układzie napędowym. W porównaniu do regulatora PD, podejście to zapewnia również większe bezpieczeństwo pracy silników poprzez eliminację przeciążeń wynikających z dynamicznych zmian prędkości obrotowych.

Wprowadzenie systemów bezzałogowych do służby wiąże się z koniecznością odpowiedniego doboru i wyszkolenia kadry oraz opracowania procedur zapewniających ich efektywne wykorzystanie w różnorodnych scenariuszach operacyjnych. Szczególnego znaczenia nabiera integracja kompetencji operatorów z wiedzą techniczną obejmującą eksploatację systemów zasilania, diagnostykę oraz zarządzanie energią.

Istotnym elementem funkcjonowania BSP w Policji jest zapewnienie ich stałej gotowości operacyjnej w warunkach nieprzewidywalności zdarzeń. Wymaga to utrzymywania części akumulatorów w stanie pełnego naładowania, co z kolei prowadzi do ich przyspieszonej degradacji. W związku z tym konieczne jest opracowanie zoptymalizowanych strategii zarządzania energią, uwzględniających zarówno wymagania operacyjne, jak i właściwości eksploatacyjne ogniw.

Efektywne wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych w Policji wymaga synergii pomiędzy zaawansowanymi metodami sterowania, właściwą organizacją działań oraz świadomym zarządzaniem energią. Zastosowanie metod optymalnych, takich jak SDRE, może stanowić istotny krok w kierunku zwiększenia efektywności operacyjnej oraz wydłużenia czasu pracy systemów bezzałogowych.

LITERATURA

1. <https://uk.mathworks.com/help/uav/ug/uav-package-delivery.html>
2. <https://magazyn-ksp.policja.gov.pl/mag/technologie/137760,Policja-dzisiaj-i-jutro.html>
3. <https://www.nyc.gov/site/nypd/stats/reports-analysis/uas-drones.page>
4. <https://news.npcc.police.uk/releases/drones-strengthening-city-centre-policing>
5. Nekoo, S.R., Acosta, J.Á., Ollero, A.. Fully Coupled Six-DoF Nonlinear Suboptimal Control of a Quadrotor: Application to Variable-Pitch Rotor Design. In: *ROBOT 2019: Fourth Iberian Robotics Conference*, Springer, Cham, 2020.
6. Çimen, T. Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the state-dependent Riccati equation (SDRE) method. *Annual Reviews in Control*, 2010, 34, 32–51.
7. Çimen T., and Banks S.P. Global Optimal Feedback Control for General Nonlinear Systems with Non-Quadratic Performance Criteria. *Systems & Control Letters*, 2004, 53, 327–346.
8. Chipofya M., and Lee D.J. Position and Altitude Control of a Quadcopter Using State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control. In: *17th International Conference on Control, Automation and Systems*, IEEE, 2017, pp.1242–1244.

9. Çimen T. Survey of State-Dependent Riccati Equation in Nonlinear Optimal Feedback Control Synthesis. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, **35**, 1025–1047.
10. Banks H.T., Lewis B.M., and Tran H.T. Nonlinear Feedback Controllers and Compensators: A State-Dependent Riccati Equation Approach. *Computational Optimization and Applications*, 2008, **37**, 177–218.
11. Giernacki W., Gośliński J., Goślińska J., Espinoza-Fraire T., and Rao J. Mathematical Modeling of the Coaxial Quadrotor Dynamics for Its Attitude and Altitude Control. *Energies*, 2021, **14**, 1232.

OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN POLICE UNMANNED SYSTEMS IN THE CONTEXT OF CONTROL AND OPERATIONAL-INTELLIGENCE ACTIVITIES

Abstract

This paper presents the problem of energy consumption optimization in police unmanned systems in the context of control and operational-intelligence activities. A dynamic model of a quadrotor is introduced, and two control approaches are compared: a classical PD controller and an optimal control method based on the State-Dependent Riccati Equation (SDRE). The conducted simulations demonstrate that the application of SDRE enables smoother flight trajectories and reduces energy consumption of the motors. In addition, practical aspects of the use of unmanned aerial systems in police operations are discussed, with particular emphasis on energy management under conditions requiring continuous operational readiness. Key challenges related to battery operation are identified, highlighting the need for the development of efficient energy management strategies

Key words: operational-intelligence activities, drone modeling, optimal control, optimization in police operations

Judyta PASZKOWSKA*
Rafał ŚLEFARSKI*

WYKORZYSTANIE NISKOTEMPERATUROWEGO CIEPŁA ODPADOWEGO W SYSTEMACH ENERGETYCZNYCH: POTENCJAŁ, TECHNOLOGIE I ZNACZENIE DLA BEZPIECZEŃSTWA ENERGETYCZNEGO

Niskotemperaturowe ciepło odpadowe stanowi istotny, lecz nadal niewystarczająco wykorzystywany zasób energetyczny krajowego przemysłu. Jego zagospodarowanie może przyczynić się do ograniczenia zużycia energii pierwotnej, poprawy efektywności energetycznej przedsiębiorstw oraz zwiększenia odporności systemu energetycznego. W artykule przedstawiono znaczenie tego zasobu w kontekście struktury przemysłu i bezpieczeństwa energetycznego państwa, a także omówiono główne kierunki jego wykorzystania: bezpośrednie zastosowanie ciepła, użycie pomp ciepła oraz konwersję do energii elektrycznej. Wskazano, że mimo rosnącej dojrzałości technologicznej rozwiązań, skala ich wdrażania pozostaje ograniczona głównie przez bariery ekonomiczne i organizacyjne. Szersze wykorzystanie ciepła odpadowego może stanowić nie tylko element poprawy efektywności, lecz także jeden z kierunków budowy bardziej niezależnego i rozproszonego systemu energetycznego.

Słowa kluczowe: ciepło odpadowe, bezpieczeństwo energetyczne, odzysk energii

1. WPROWADZENIE

Bezpieczeństwo energetyczne stanowi jeden z podstawowych warunków sprawnego funkcjonowania państwa. Od dostępności energii zależy nie tylko działanie infrastruktury krytycznej i systemów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo publiczne oraz militarne, ale również ciągłość procesów produkcyjnych, transportowych i usługowych, które podtrzymują funkcjonowanie życia społecznego i gospodarczego. Dotyczy to także tych obszarów, które decydują o zaspokajaniu podstawowych potrzeb

* Politechnika Poznańska, Instytut Energetyki Ciepłej

ludności, takich jak ochrona zdrowia, edukacja, zaopatrzenie w wodę czy dostęp do żywności. We współczesnych warunkach są one bowiem w dużej mierze uzależnione od stabilnego działania złożonych łańcuchów dostaw, przetwarzania i dystrybucji, których podstawą pozostaje energia.

Szczególne znaczenie w tym układzie ma przemysł, będący jednym z filarów gospodarki oraz jednym z największych odbiorców energii. Jego sprawne funkcjonowanie warunkuje nie tylko utrzymanie produkcji i miejsc pracy, ale również dostępność materiałów, wyrobów i półproduktów niezbędnych dla wielu innych sektorów gospodarki. Zdolność do utrzymania ciągłości działania przemysłu stanowi więc jeden z istotnych elementów odporności państwa, co w ostatnich latach obserwować można podczas trwającej wojny w Ukrainie.

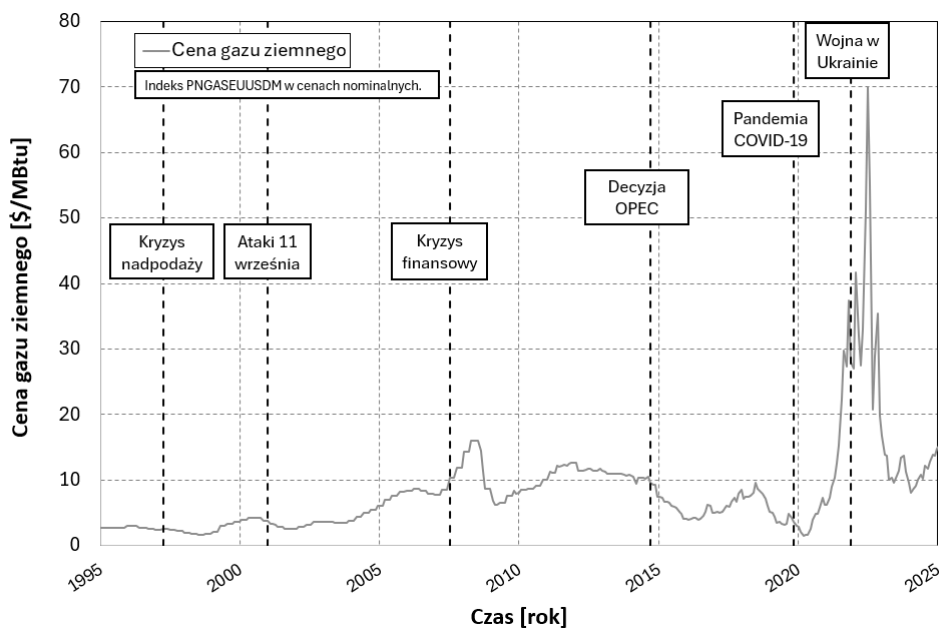
W warunkach ograniczonego dostępu do własnych zasobów energii pierwotnej szczególnego znaczenia nabiera możliwe pełne wykorzystanie tych zasobów energetycznych, które są już dostępne w kraju lub zostały wcześniej pozyskane. Z tego względu poprawa efektywności energetycznej i ograniczanie strat nie powinny być traktowane wyłącznie jako narzędzia optymalizacji kosztów, lecz również jako element wzmacniania bezpieczeństwa energetycznego gospodarki. W tym kontekście istotnym, nadal niedostatecznie wykorzystanym zasobem pozostaje ciepło odpadowe powstające w procesach przemysłowych, w tym zwłaszcza ciepło o niższych parametrach temperaturowych. Jego szersze zagospodarowanie może stanowić jeden z kierunków zwiększania niezależności energetycznej oraz poprawy odporności krajowego systemu gospodarczego.

2. ZNACZENIE PRZEMYSŁU W BILANSIE ENERGETYCZNYM I GOSPODARCE, ZALEŻNOŚĆ OD PALIW KOPALNYCH

Kwestia zwiększania niezależności staje się coraz bardziej istotna, ponieważ polski system energetyczny pozostaje w dużym stopniu oparty na paliwach kopalnych, a znaczna część wykorzystywanych nośników energii pochodzi z importu. Udział importu wynosi 79,5% dla gazu ziemnego, 98,4% dla ropy naftowej oraz 17,3% dla węgla kamiennego (Główny Urząd Statystyczny, 2025). Taka struktura zwiększa podatność systemu na czynniki zewnętrzne, ponieważ dostępność i ceny paliw są silnie powiązane z sytuacją geopolityczną oraz decyzjami politycznymi, na które państwo ma ograniczony wpływ, co pokazano przykładowo dla cen gazu ziemnego na wykresie (Rys. 1).

Zależność od importowanych paliw osłabia bezpieczeństwo energetyczne nie tylko na poziomie systemowym, ale również na poziomie przedsiębiorstw, których koszty funkcjonowania, a niekiedy także zdolność do utrzymania działalności, pozostają silnie uzależnione od wahań cen surowców. Przykładem mogą być zawirowania na rynku paliw w roku 2022, oraz 2026 (po rozpoczęciu konfliktu na Bliskim Wschodzie). Z tego względu wzmacnianie bezpieczeństwa energetycznego powinno obejmować nie tylko

dywersyfikację kierunków dostaw, lecz także nacisk na lepsze wykorzystanie lokalnych i wtórnych zasobów energetycznych, zwłaszcza biorąc pod uwagę, że przemysł odpowiada za 33,1% krajowego zużycia energii (Główny Urząd Statystyczny, 2025a; Główny Urząd Statystyczny, 2025b; Główny Urząd Statystyczny, 2025c).



Rys. 1. Zmiana cen gazu ziemnego w czasie (International Monetary Fund, 2026)

W tym kontekście istotne znaczenie ma wdrażanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w obszarze energii, rozumiane jako możliwie pełne wykorzystanie energii już obecnej w procesach gospodarczych. Podejście to pozwala ograniczać straty energii, a tym samym zmniejszać zużycie paliw pierwotnych, co bezpośrednio przekłada się na większą odporność nie tylko samych przedsiębiorstw, ale również całego systemu energetycznego na niekorzystne czynniki zewnętrzne. Szczególną rolę mogą odgrywać przy tym zasoby lokalne i rozproszone, w tym przedsiębiorstwa produkcyjne, w których energia odpadowa może być wykorzystywana na miejscu, na przykład do wytwarzania energii elektrycznej. Rozwiązania tego typu nie tylko ograniczają zależność od zewnętrznych dostaw energii, lecz również zmniejszają koncentrację ryzyka w systemie, charakterystyczną dla dużych, scentralizowanych jednostek.

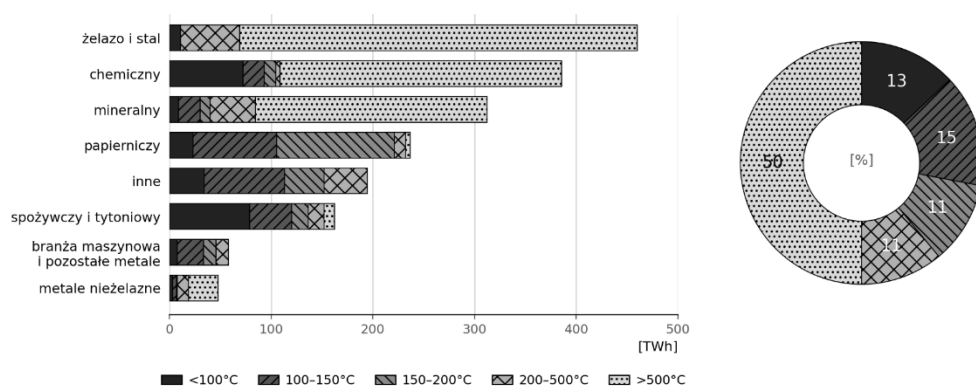
Lokalne, rozproszone wykorzystanie energii odpadowej, zwłaszcza do produkcji energii elektrycznej, może przyczynić się nie tylko do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego pod kątem odporności na działania dywersyjne państw obcych, ale również pod kątem zmniejszania skutków klęsk żywiołowych, których globalne nasilenie w ostatnich latach wykazuje trend rosnący.

Warto również zauważyć, że dodatkową zaletą energii odpadowej pochodzącej z procesów przemysłowych jest to, że powstaje ona w tym samym czasie, w którym zakłady wykazują wysokie zapotrzebowanie na energię. Innymi słowy, brak procesów przemysłowych oznacza jednocześnie brak zapotrzebowania na energię i brak samego strumienia energii odpadowej. Cecha ta odróżnia ciepło odpadowe od wielu innych źródeł energii – zwłaszcza rozproszonych źródeł OZE – i wzmacnia jego przydatność jako zasobu wspierającego lokalne bilansowanie potrzeb energetycznych przemysłu.

3. POTENCJAŁ CIEPŁA ODPADOWEGO W PRZEMYSŁE

W świetle przedstawionych wcześniej uwarunkowań bezpieczeństwa energetycznego oraz znaczenia efektywnego wykorzystania zasobów lokalnych i wtórnych, zasadne staje się pytanie o rzeczywistą skalę i strukturę źródeł ciepła odpadowego dostępnego w przemyśle. Jeżeli odzysk energii ma stanowić jeden z elementów ograniczania zależności od paliw pierwotnych i poprawy odporności zarówno przedsiębiorstw, jak i całego systemu energetycznego, konieczne jest określenie nie tylko ilości tego zasobu, ale również jego parametrów jakościowych, w szczególności temperatury.

Należy przy tym podkreślić, że w wielu zakładach przemysłowych ciepło jest już obecnie wykorzystywane w sposób kaskadowy. W efekcie strumienie o wyższych parametrach temperaturowych są często przynajmniej częściowo zagospodarowane, natomiast głównym niezagospodarowanym zasobem pozostaje ciepło niskotemperaturowe, poniżej 300°C, a zwłaszcza poniżej 150°C. To właśnie ten zakres temperatur stanowi obecnie najważniejszy obszar dalszych analiz i potencjalnych wdrożeń.



Rys. 2. Szacowane całkowite końcowe zapotrzebowanie na energię do ciepła procesowego w 2019 r. według temperatury w krajach UE-27 (Fraunhofer ISI, 2024)

Znaczenie tego zasobu zależy jednak nie tylko od jego ilości, lecz również od charakterystyki procesów prowadzonych w danym zakładzie. Możliwość lokalnego wykorzystania ciepła odpadowego, np. z zastosowaniem pomp ciepła, jest ściśle związana z profilem temperaturowym procesów technologicznych oraz z zapotrzebowaniem na ciepło o określonych parametrach. Zestawienie zapotrzebowania na energię cieplną (Rys. 2) w różnych przedziałach temperatur wskazuje, że w branży spożywczej i papierniczej dominują procesy niskotemperaturowe, natomiast w branży hutniczej, mineralnej i chemicznej wysokotemperaturowe. Oznacza to, że zarówno charakter dostępnego ciepła odpadowego, jak i możliwości jego wykorzystania są silnie zróżnicowane między poszczególnymi gałęziami przemysłu.

Z tego względu analiza potencjału dostępności ciepła odpadowego ma bezpośredni związek ze strukturą przemysłu, ponieważ to ona współdecyduje o ilości i jakości dostępnego ciepła odpadowego. W polskim przemyśle przetwórczym dominują trzy sektory — spożywczy, chemiczny i mineralny — które w 2023 r. odpowiadały łącznie za 67,8% finalnego zużycia energii (Główny Urząd Statystyczny, 2025a; Główny Urząd Statystyczny, 2025b; Główny Urząd Statystyczny, 2025c). Oznacza to, że właśnie te branże w największym stopniu kształtują zarówno skalę potencjalnych strumieni energii odpadowej, jak i ich profil temperaturowy.

Przy interpretacji danych ilościowych zasadne wydaje się odniesienie dostępnych analiz UE do warunków polskiego przemysłu. Choć struktura przemysłowa poszczególnych państw członkowskich różni się w szczegółach, przemysł polski funkcjonuje w zbliżonym otoczeniu regulacyjnym i technologicznym, co pozwala traktować dane dla Unii Europejskiej jako użyteczny punkt odniesienia dla oszacowania krajowego potencjału ciepła odpadowego.

Analizy prowadzone dla przemysłu w Unii Europejskiej wskazują na bardzo istotne strumienie energii odpadowej w branżach dominujących również w Polsce. Zgodnie z Luberti et al., 2022 ilość energii odpadowej w przemyśle spożywczym wynosi 72,45 TWh rocznie w UE, z czego 89,3% stanowi energia poniżej 100°C. Zbliżone wartości przedstawiono w (Turek et al. 2024), gdzie dla tej samej branży wskazano 70 TWh/rok energii odpadowej, przy udziale ciepła poniżej 100°C na poziomie 55,7%. Dla branży chemicznej raportowany w literaturze strumień energii odpadowej wynosi 155 TWh/rok (Turek et al. 2024), natomiast dla branży mineralnej 119,3 TWh/rok (Luberti et al., 2022). Średnie dane dotyczące strumienia traconej energii oraz udziału poszczególnych przedziałów temperatur w traconej energii raportowane w literaturze przedstawiono w tabeli (Tab. 1).

Tabela 1

Ilość ciepła odpadowego w podziale na gałęzie przemysłu – wartości średnie z opracowań (Papapetrou et al., 2018; Turek et al., 2024; Luberti et al., 2022)

Przemysł	Średnia suma całkowita dostępnej energii odpadowej [TWh]	Średni udział ciepła poniżej 300 °C	Średni udział ciepła poniżej 100 °C
Spożywczy, napojów i tytoniowy	56,15	85,5%	49,6%
Papierniczy	44,10	93,3%	60,0%
Metale nieżelazne	24,70	13,9%	0,6%
Metalurgiczny	128,97	26,8%	10,3%
Chemiczny	109,00	77,8%	30,1%
Górnictwo	26,73	69,6%	57,4%
Tekstylny	10,00	65,0%	60,0%
Mineralny	119,30	0,0%	0,0%

Odniesienie tych strumieni do całkowitego zapotrzebowania na energię w poszczególnych typach przemysłu, raportowanego w Fraunhofer ISI (2024), prowadzi do wniosku, że w większości analiz około 30–40% zużywanej energii jest tracone jako energia odpadowa, zarówno w przemyśle spożywczym, chemicznym, jak i mineralnym. Są to jednocześnie branże odpowiadające za większość zużycia energii w sektorze przemysłowym w Polsce. Dane te wskazują, że potencjał energii odpadowej w Polsce może być wynosić nawet 87 TWh/rok tylko przy uwzględnieniu jedynie branży spożywczej, chemicznej i mineralnej.

4. TECHNOLOGIE ZAGOSPODAROWANIA NISKOTEMPERATUROWEGO CIEPŁA ODPADOWEGO

4.1. Bezpośrednie wykorzystanie ciepła i podniesienie parametrów użytkowych

Najprostszą metodą zagospodarowania niskotemperaturowego ciepła odpadowego jest jego bezpośrednie wykorzystanie u źródła. Obejmuje to przede wszystkim rekuiperację ciepła w wymiennikach, np. do podgrzewu powietrza do spalania, gazów procesowych, wody technologicznej, wody zasilającej lub innych strumieni kierowanych do kolejnych etapów procesu. Rozwiązania te są zwykle najtańsze i najłatwiejsze do wdrożenia, dlatego w wielu zakładach zostały już zastosowane wszędzie tam, gdzie było to technicznie i ekonomicznie uzasadnione.

Taki odzysk ma jednak ograniczenia. Wymaga jednoczesnego występowania źródła ciepła odpadowego i odbiornika o odpowiednio dobranych parametrach. W praktyce problemem bywa zbyt niska temperatura źródła ciepła, dlatego uzupełnieniem bezpośredniego odzysku energii odpadowej są pompy ciepła, które pozwalają podnieść poziom temperaturowy ciepła odpadowego i wykorzystać je tam, gdzie sam wymiennik nie wystarcza. W tym sensie nie zastępują one prostego odbioru ciepła, lecz rozszerzają zakres jego użytecznego wykorzystania. Mogą służyć zarówno do produkcji gorącej wody i podgrzewu mediów procesowych, jak i do bardziej zaawansowanych zastosowań, w tym do wytwarzania pary technologicznej. W obecnym stanie rozwoju techniki właśnie wysokotemperaturowe pompy ciepła należą do najbardziej aktywnie rozwijanych rozwiązań, ponieważ otwierają dostęp do dużego zasobu ciepła odpadowego, który bez podniesienia temperatury pozostaje trudny do praktycznego wykorzystania. Znaczenie tych technologii będzie również prawdopodobnie rosło wraz ze wzrostem udziału OZE w systemie elektroenergetycznym, ponieważ pompy ciepła mogą pracować elastycznie, zwiększając pobór energii elektrycznej w okresach wysokiej generacji, np. w ciągu dnia przy dużej produkcji energii słonecznej. W efekcie stają się one nie tylko narzędziem poprawy efektywności energetycznej, ale także elementem lepszego bilansowania energii w zakładzie.

Dostępne rozwiązania pokazują kilka głównych kierunków rozwoju. Układ Kobe Heating and Cooling Supply odbiera ciepło odpadowe o temperaturze około 65°C i wykorzystuje pompy ciepła pracujące do wytwarzania pary o temperaturze 110–120°C. PILLER rozwija układy oparte na MVR (Mechanical Vapor Recompression), wykorzystujące jako medium procesowe parę lub wodę, z możliwością kaskadowego sprężania. Aneo oferuje wysokotemperaturowe pompy ciepła do produkcji pary o temperaturze powyżej 100°C i ciśnieniu do 5 bar. EPCON rozwija układy wysokotemperaturowe z mechanicznym sprężaniem pary wodnej, pracujące także w konfiguracji kaskadowej, natomiast ThermBooster firmy SPH osiąga temperatury do 165°C i może pracować w układach wodno-wodnych lub wodno-parowych.

4.2. Konwersja do energii elektrycznej

W konwersji niskotemperaturowego ciepła odpadowego do energii elektrycznej punktem odniesienia pozostaje obecnie obieg ORC (z ag. Organic Rankine Cycle), który dzięki zastosowaniu organicznego czynnika roboczego o niskiej temperaturze wrzenia umożliwia wytwarzanie energii elektrycznej już dla źródeł o temperaturze około 60–150°C, osiągając zwykle sprawność rzędu 8–18% (Sanchez, Barba Salvador and Mata Montes, 2025). Jego przewaga wynika nie tylko z relatywnie prostej architektury, lecz także z wysokiej dojrzałości technicznej i szerokiego zakresu możliwych zastosowań przemysłowych. Dlatego ORC pozostaje dziś najlepiej rozpoznany i najbardziej dojrzałym rozwiązaniem komercyjnym dla odzysku energii elektrycznej z ciepła nisko i średniotemperaturowego.

Jeżeli jednak charakter źródła ciepła wskazuje na dużą zmienność parametrów, klasyczny ORC nie zawsze zapewnia najlepsze dopasowanie termodynamiczne. W takich przypadkach rozważany bywa obieg TFC (z ag. Trilateral Flash Cycle), w którym czynnik nie jest całkowicie odparowywany przed rozprężaniem, lecz doprowadzany jedynie do stanu bliskiego nasycenia, a właściwe odparowanie „flash” zachodzi częściowo już w ekspanderze. Pozwala to lepiej dopasować przebieg temperatury czynnika do strumienia ciepła jawnego i ograniczyć obniżenie egzergii. Wymaga to jednak rozprężania mieszaniny dwufazowej, co wyraźnie komplikuje konstrukcję i ogranicza zakres praktycznych wdrożeń.

Tam, gdzie dąży się do lepszego dopasowania przebiegu temperaturowego czynnika do źródła ciepła, naturalnym rozwinięciem względem ORC jest cykl Kaliny. Wykorzystuje on mieszaninę amoniak–woda, której nieizotermiczne parowanie i skraplanie pozwala ograniczyć straty egzergii w wymiennikach. Typowy zakres temperatur pracy wynosi 90–200°C, a sprawność 10–20%. W niektórych zastosowaniach wskazuje się nawet przewagę sprawnościową rzędu 20–40% względem ORC, choć okupioną większą złożonością układu, trudniejszym sterowaniem i bardziej wymagającą eksploatacją (Sanchez, Barba Salvador and Mata Montes, 2025). Z tego względu cykl Kaliny należy traktować jako technologię rozwiniętą, ale wyraźnie mniej rozpo-
wszechnioną niż ORC.

Gdy poza energią elektryczną pożądanym jest również efekt chłodniczy, bardziej uzasadniony staje się cykl Goswami, łączący obieg mocy z obiegiem absorpcyjnym w jednej pętli amoniak–woda. Rozwiązanie to pozwala jednocześnie wytwarzać energię elektryczną i chłód, dlatego jest szczególnie interesujące w układach kogeneracyjnych i trigeneracyjnych. W literaturze przypisuje mu się szeroki zakres temperatur źródła, od około 60 do 350°C, oraz sprawność cieplną do około 30%. Jest to nadal technologia głównie laboratoryjna; a jej ograniczenia obejmują toksyczność amoniaku, ograniczoną elastyczność regulacyjną oraz spadek efektywności chłodzenia przy temperaturach źródła poniżej około 200°C (Sanchez, Barba Salvador and Mata Montes, 2025).

Odmianą grupę stanowią rozwiązania bezpośredniej lub prawie bezpośredniej konwersji ciepła na energię elektryczną. Najlepiej rozpoznane spośród nich są generatory termoelektryczne, wykorzystujące efekt Seebecka, w których gradient temperatury w materiale półprzewodnikowym generuje napięcie elektryczne bez udziału części ruchomych. Ich podstawową zaletą jest prostota, cicha praca i wysoka niezawodność, natomiast zasadniczą wadą pozostaje niska sprawność: dla zakresu 50–150°C najczęściej wynosi ona 2–5%. Z tego powodu technologia ta znajduje zastosowanie przede wszystkim tam, gdzie ważniejsze od maksymalnej sprawności są brak części ruchomych, niewielka skala i łatwość integracji.

Pomiędzy układami obiegowymi a konwersją bezpośrednią lokują się silniki Stirlinga, które wykorzystują cykliczne sprężanie i rozprężanie gazu roboczego ogrzewanego zewnątrz. W porównaniu z ORC są one mniej rozpowszechnione, ale pozostają interesujące dla umiarkowanych temperatur źródła, rzędu 80–200°C, przy spraw-

nościach około 10–15% (Sanchez, Barba Salvador and Mata Montes, 2025). Ich atutem jest zwarta konstrukcja i elastyczność względem źródła ciepła, natomiast ograniczeniem wyższy koszt i niższa dojrzałość rynkowa.

Na tym tle do technologii najlepiej rozpoznanych i wdrażanych przemysłowo należy zaliczyć przede wszystkim ORC, podczas gdy cykl Kaliny i silniki Stirlinga reprezentują rozwiązania rozwinięte, lecz stosowane wyraźnie rzadziej. Z kolei cykl Goswamięgo, a także inne koncepcje konwersji ciepła niskotemperaturowego – takie jak generatory termoakustyczne, termooogniwa elektrochemiczne, odzysk pyroelektryczny czy napędy SMA należy obecnie traktować przede wszystkim jako kierunki rozwojowe, które nie osiągnęły jeszcze pozycji porównywalnej z ORC w zastosowaniach przemysłowych.

5. BARIERY WDROŻENIOWE I OGRANICZENIA RACHUNKU MIKROEKONOMICZNEGO

Po omówieniu skali zasobów ciepła odpadowego oraz technologii jego zagospodarowania warto wskazać, dlaczego sektor ten nadal rozwija się wolniej, niż wynikałoby to z jego potencjału technicznego. Z perspektywy pojedynczego przedsiębiorstwa podstawową barierą pozostaje bowiem niekorzystny rachunek mikroekonomiczny. Inwestycje w odzysk ciepła lub jego konwersję na energię elektryczną wymagają wysokich nakładów początkowych, wiążą się z ryzykiem integracyjnym i operacyjnym oraz często oznaczają długi okres zwrotu. Wynika on nie tylko z kosztu samego układu odzysku, lecz również z konieczności budowy infrastruktury towarzyszącej, obejmującej wymienniki, automatykę, magazynowanie oraz integrację z istniejącym procesem technologicznym. Dodatkowym ograniczeniem jest niska sprawność konwersji energii przy źródłach niskotemperaturowych: dla obiegów ORC wynosi ona zwykle około 8–18% przy 60–150°C, dla cyklu Kaliny 10–20% przy 90–200°C, dla silników Stirlinga około 10–15% przy 80–200°C, a dla generatorów termoelektrycznych jedynie 2–7% przy 50–150°C (Sanchez, Barba Salvador and Mata Montes, 2025). W praktyce oznacza to, że nawet poprawnie zaprojektowane instalacje często zapewniają ograniczony uzysk energii względem ponoszonych kosztów, szczególnie przy zmiennych i rozproszonych strumieniach ciepła odpadowego. Z tego względu wiele takich przedsięwzięć nie osiąga satysfakcjonującej opłacalności z punktu widzenia pojedynczego zakładu.

Ocena ta jednak może się zmienić, gdy wyjść poza wąski rachunek przedsiębiorstwa i uwzględnić korzyści systemowe, takie jak ograniczenie zużycia paliw pierwotnych, zmniejszenie podatności gospodarki na zakłócenia dostaw energii, rozwój krajowych kompetencji technologicznych oraz stopniowe obniżanie ryzyka kolejnych wdrożeń wraz z upowszechnianiem rozwiązań. W takim ujęciu wdrażanie technologii zagospodarowania ciepła odpadowego może okazywać się bardziej racjonalne, niż

wynikałoby to wyłącznie z mikroekonomicznej perspektywy inwestora. Należy jednak podkreślić, że nie chodzi wyłącznie o konwersję ciepła odpadowego do energii elektrycznej. Przy sprawności elektrycznej rzędu 10% z oszacowanego wcześniej zasobu energii odpadowej z trzech analizowanych gałęzi przemysłu można byłoby uzyskać około 8,73 TWh energii elektrycznej; odpowiada to około 5,2% krajowego zużycia energii elektrycznej w Polsce w 2025 r. Pokazuje to, że pełna konwersja ciepła odpadowego do energii elektrycznej, zwłaszcza w przypadku źródeł niskotemperaturowych, może być rozwiązaniem mało efektywnym, dlatego równie istotnym kierunkiem pozostaje jego bezpośrednie wykorzystanie cieplne, w tym z użyciem wysokotemperaturowych pomp ciepła.

6. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza wskazuje, że potencjał wykorzystania niskotemperaturowego ciepła odpadowego jest istotny, lecz nadal pozostaje w dużej mierze niewykorzystany. Technologie jego zagospodarowania są już dostępne lub znajdują się na etapie średniej gotowości technologicznej, co oznacza, że ograniczenia rozwoju tego obszaru wynikają dziś często bardziej z uwarunkowań ekonomicznych i organizacyjnych niż z braku rozwiązań technicznych. Jednakże szersze wykorzystanie tej energii może przyczyniać się zarówno do ograniczenia zużycia energii pierwotnej, jak i do zmniejszenia zależności od scentralizowanych dostaw, wspierając tym samym rozwój bardziej odpornego i rozproszonego systemu energetycznego. W konsekwencji szersze wykorzystanie tego zasobu należy postrzegać nie tylko w kategoriach poprawy efektywności energetycznej, ale również jako jeden z elementów budowy bardziej niezależnej i odpornej gospodarki.

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. Papapetrou M., Kosmadakis G., Cipollina A., La Commare U., Micale G., Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country, *Applied Thermal Engineering*, Tom 138, s. 208-216, 2018
2. Turek V., Kilkovsky B., Daxner J., Fialova D., Jegla Z., Industrial Waste Heat Utilization in the European Union—An Engineering-Centric Review, *Energies*, Tom 17, nr 9, 2024
3. Luberti M., Gowans R., Finn P., Santori G., An estimate of the ultralow waste heat available in the European Union, *Edinburgh Research Explorer, Energy*, Tom 238, 2022

4. Sanchez, F.D., Barba Salvador, J. and Mata Montes, C. (2025) ‘Organic Rankine Cycle System Review: Thermodynamic Configurations, Working Fluids, and Future Challenges in Low-Temperature Power Generation’, *Energies*, 18, 6561. <https://doi.org/10.3390/en18246561>

Opracowania i raporty z badań

1. Główny Urząd Statystyczny, Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2023 i 2024, Warszawa/Rzeszów, 2025, dostęp: strona GUS „Środowisko. Energia”.
2. Główny Urząd Statystyczny, Energia 2025, Warszawa 2025, data publikacji: 23.06.2025.
3. Główny Urząd Statystyczny, Efektywność wykorzystania energii w latach 2013–2023, Warszawa–Rzeszów 2025.
4. International Monetary Fund, Global price of Natural gas, EU (seria: PNGASEUUSDM), FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis

ACKNOWLEDGEMENTS

Badania były finansowane w ramach Programu Doktorat Wdrożeniowy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego realizowanego w latach 2025-2028 (Umowa nr DWD/9/0193/2025 z dnia 01.12.2025).

UTILIZATION OF LOW-TEMPERATURE WASTE HEAT IN INDUSTRY: POTENTIAL, TECHNOLOGIES, AND ITS IMPORTANCE FOR ENERGY SECURITY

Abstract

Low-temperature waste heat constitutes a significant yet still underutilized energy resource of the domestic industry. Its utilization can contribute to reducing primary energy consumption, improving the energy efficiency of enterprises, and increasing the resilience of the energy system. The article presents the importance of this resource in the context of the industrial structure and national energy security, and discusses the main directions of its use: direct heat application, the use of heat pumps, and conversion to electricity. It is indicated that despite the growing technological maturity of the solutions, the scale of their implementation remains limited, mainly due to economic and organizational barriers. Broader utilization of waste heat may constitute not only an element of efficiency improvement, but also one of the directions for building a more independent and decentralized energy system.

Keywords: waste heat, energy security, energy recovery

Witalis PELLOWSKI*
Agnieszka IWAN*
Adam JANUSZKO*

NUKLEARNY KONWERTER ENERGII Z PLAZMONICZNYM WZMOCNIENIEM SCYNTYLACJI I EFEKTEM PURCELLA

Konwersja promieniowania jonizującego na użyteczną energię elektryczną stanowi pionierską technologię hybrydowego pozyskiwania energii, z potencjalnymi zastosowaniami w misjach kosmicznych, teledetekcji i specjalistycznych systemach energetycznych. Przedstawiamy ramy koncepcyjne jądrowo-plazmonowo-fotowoltaicznego konwertera energii (NPV), który integruje źródło radioaktywne, ośrodek scyntylacyjny wzbogacony nanostrukturami plazmonicznymi oraz ogniwo fotowoltaiczne (PV) zoptymalizowane pod kątem absorpcji światła widzialnego. Struktury plazmoniczne działają jak lokalne koncentratory pola elektromagnetycznego, zwiększając wydajność scyntylacji i dopasowanie widmowe do ogniwa PV. Model konwertera NPV opiera się na podejściu multidyscyplinarnym, łączącym fizykę jądrową, plazmoniczną nanofotonikę i fotowoltaikę, wyznaczając drogę do kompaktowych, wysokosprawnych źródeł energii w środowiskach, w których konwencjonalne pozyskiwanie energii jest nieopłacalne.

Słowa kluczowe: konwersja energii jądrowej, scyntylacje, efekt plazmoniczny, ogniwa fotowoltaiczne

1. WPROWADZENIE

Konwencjonalne źródła energii (np. baterie chemiczne, ogniwa paliwowe i ogniwa fotowoltaiczne) nie spełniają rygorystycznych wymagań operacyjnych w surowych warunków, np. długoterminowej trwałości, pracy bez konieczności konserwacji oraz ciągłych samowystarczalności. Ich ograniczona gęstość energetyczna, wrażliwość na

* Instytut Inżynierii Bezpieczeństwa, Wydział Nauk o Bezpieczeństwie, Akademia Wojsk Lądowych imienia Generała Tadeusza Kościuszki.

czynniki środowiskowe oraz konieczność okresowej konserwacji czynią je niepraktycznymi do misji wymagających ciągłego, bezdozoru zasilania przez wiele lat. W dobie poszukiwania nowoczesnych, wydajnych i kompaktowych źródeł energii, rozwój technologii konwersji energii nuklearnej staje się coraz bardziej istotny. Nowatorskim podejściem jest zastosowanie scyntylatorów do bezpośredniej konwersji energii promieniowania jonizującego na światło widzialne lub bliskie podczerwieni. Scyntylacja, proces w którym materiały emitują fotony w odpowiedzi na absorpcję promieniowania jonizującego, pozwala na znacznie szybszą i bardziej bezpośrednią transformację energii, otwierając drogę do bardziej kompaktowych i efektywnych układów [Iwan, Pellowski i Bogdanowicz 2021, Iwan et al. 2024]. Dodatkowym przełomem w tej dziedzinie jest plazmoneczne wzmocnienie scyntylacji, które polega na wykorzystaniu nanostruktur metalicznych do koncentracji i wzmocnienia pola elektromagnetycznego w pobliżu materiału scyntylacyjnego. Dzięki temu proces emisji fotonów staje się bardziej efektywny, co prowadzi do znacznego zwiększenia wydajności procesu konwersji energii. Efekt Purcella (PE) polega na zmianie szybkości emisji promieniowania przez emiter (np. atom, cząsteczkę, kropkę kwantową) w zależności od jego otoczenia elektromagnetycznego [Purcell 1995]. Połączenie nuklearnej konwersji energii ze scyntylacją wzmocnianą plazmonecznie oraz z wykorzystaniem PE może zatem otworzyć nowe możliwości w projektowaniu miniaturowych generatorów, detektorów promieniowania, czy systemów zasilania przyszłości. Łączyć one mogą wysoką sprawność, niskie straty energetyczne i potencjalnie mniejsze ryzyko związane z klasycznymi systemami konwersji energii jądrowej.

Dają one możliwość realizacji bezawaryjnego zasilania niewielkich urządzeń (odbiorników) przez dziesięciolecia np. w przestrzeni kosmicznej, głębiach oceanicznych lub strefach, gdzie nie występuje infrastruktura energetyczna. Takie rozwiązania znalazły już swoje aplikacje w szeregu eksperymentalnych prototypów [Sychov et al. 2008, Jiang et al. 2021]. Celem użytkowo-poznawczym jest zaproponowanie koncepcji wytworzenia nuklearnego konwertera energii wykorzystującego plazmoneczne wzmocnienie emisji scyntylacyjnej oraz efekt Purcella w kierunku zwiększenia sprawności konwersji energii jądrowej, optycznej i elektrycznej. Poprzez kontrolowanie środowiska elektromagnetycznego na poziomie nano taki konwerter, umożliwi pozyskanie więcej światła z tej samej dawki promieniowania co jest kluczowe dla powodzenia operacji strategicznych.

2. RETROSPEKCJA STANU BADAŃ I ROZWOJU TECHNOLOGII

Badania nad konwersją energii promieniowania jonizującego mają długą i wieloetapową historię, sięgającą końca XIX wieku, kiedy zaobserwowano pierwsze zjawiska luminescencji indukowanej promieniowaniem rentgenowskim. Wczesne eksperymenty wykazały zdolność niektórych materiałów (np. $\text{Ba}[\text{Pt}(\text{CN})_4]$) do emisji światła pod wpływem promieniowania, co stanowiło fundament dla rozwoju scyntylatorów

jako konwerterów energii promieniowania na promieniowanie optyczne. W pierwszej połowie XX wieku nastąpił przełom technologiczny związany z wprowadzeniem fotopowielaczy oraz liczników scyntylacyjnych, umożliwiających efektywną detekcję i konwersję sygnału optycznego na elektryczny, co znacząco rozszerzyło zakres zastosowań w fizyce jądrowej i medycynie nuklearnej [Yanagida 2018].

W okresie powojennym (lata 50.–90. XX w.) rozwój technologii scyntylacyjnych koncentrował się głównie na inżynierii materiałowej. Opracowano szeroką gamę scyntylatorów nieorganicznych (np. NaI(Tl), CsI(Tl)) oraz organicznych, optymalizując ich wydajność świetlną, czas zaniku i dopasowanie spektralne do detektorów fotonowych. W tym czasie ugruntowano również fizyczny model scyntylacji, obejmujący procesy generacji nośników ładunku, relaksacji energetycznej oraz emisji promienistej [Knoll 2010]. Pomimo znaczącego postępu, sprawność konwersji energii pozostawała ograniczona przez fundamentalne straty niepromieniste oraz brak kontroli nad lokalnym środowiskiem elektromagnetycznym emitera.

Równolegle rozwijała się koncepcja tzw. „nuclear batteries”, w których energia promieniowania jonizującego przekształcana jest w energię elektryczną. Jednym z podejść była konwersja pośrednia: promieniowanie \rightarrow scyntylacja \rightarrow konwersja fotowoltaiczna. Pierwsze analizy teoretyczne i eksperymentalne wskazywały na niską sprawność takich układów, wynikającą głównie z niedopasowania spektralnego oraz strat na etapie emisji światła [Iwan, Pellowski i Bogdanowicz 2021]. Niemniej jednak rozwój ogniw fotowoltaicznych o wysokiej czułości oraz nowych materiałów scyntylacyjnych przyczynił się do ponownego zainteresowania tym kierunkiem badań w XXI wieku.

Przełom nastąpił wraz z rozwojem nanofotoniki i plazmoniki, które umożliwiły aktywną kontrolę emisji spontanicznej poprzez inżynierię lokalnej gęstości stanów elektromagnetycznych (LDOS). Wprowadzenie koncepcji efektu Purcella do układów scyntylacyjnych otworzyło nowe możliwości zwiększenia szybkości emisji oraz wydajności kwantowej. Kluczowym elementem stało się wykorzystanie nanostruktur metalicznych (np. Au, Ag), które dzięki wzbudzeniom plazmonów powierzchniowych prowadzą do silnej lokalizacji pola elektromagnetycznego i znaczącego zmniejszenia efektywnej objętości modowej [Shahbazyan 2023]. W takich warunkach współczynnik Purcella może osiągać wartości kilku rzędów wielkości większe, niż w klasycznych rezonatorach dielektrycznych.

W ostatnich latach wykazano eksperymentalnie, że sprzężenie scyntylatorów z nanostrukturami plazmionicznymi prowadzi do istotnego skrócenia czasu zaniku emisji oraz wzrostu intensywności światła. Badania nad nanoplazmionicznym wzmocnieniem scyntylacji wskazują na możliwość poprawy parametrów detekcyjnych, takich jak rozdzielczość czasowa i efektywność detekcji promieniowania [Kurman et al. 2024]. Jednocześnie rozwijane są modele teoretyczne opisujące konkurencję między kanałami promienistymi i niepromienistymi, co jest kluczowe dla optymalizacji struktur plazmionicznych.

Obecny stan badań wskazuje na wyraźną konwergencję trzech obszarów: fizyki jądrowej, fotoniki oraz nanotechnologii. Nuklearne konwertery energii oparte na scyntylatorach, wzbogacone o struktury plazmoneczne i wykorzystujące efekt Purcella, stanowią nową klasę układów funkcjonalnych, w których kontrola procesów emisji zachodzi na poziomie nanometrycznym. Rozwój tej technologii zmierza w kierunku zwiększenia sprawności energetycznej, miniaturyzacji oraz integracji z półprzewodnikowymi detektorami i ogniwami fotowoltaicznymi, co otwiera perspektywy dla zastosowań w autonomicznych źródłach energii, detektorach promieniowania oraz systemach medycznych.

Nowoczesne scyntylatory początków XXI w. powstawały na skutek intensywnych badań materiałowych nad halogenkami (LaBr_3 , SrI_2), perowskitami i kompozytami nanostrukturalnymi. Efektem prowadzonych badań było ustalenie mechanizmu fizycznego (modelu) – będącego następczym ciągiem zdarzeń: depozycja energii (fotofekt, Compton); kreacja par elektron-dziura; transfer energii; emisja światła [Hell, Knüpfner i Mattern 2000]. Kolejnym etapem była integracja ze źródłami energii – koncepcja tzw. „nuclear battery” [Iwan, Pellowski i Bogdanowicz 2021, Terranova 2022]. W połowie lat osiemdziesiątych pojawiły się koncepcje fotonicznej konwersji promieniowania. Badano emisję światła przy promieniowaniu jonizującym i jej konwersję za pomocą ogniw fotowoltaicznych w kontekście detekcji / monitoringu [Pellowski et al. 2026].

3. MECHANIZM ZJAWISKA KONWERSJI

Konwersja energii promieniowania jonizującego w nuklearnym konwerterze energii opartym na scyntylatorze, wzmocnieniu plazmonecznym oraz efekt Purcella stanowi proces wieloetapowy, obejmujący oddziaływania jądrowe, transport energii w materii skondensowanej oraz procesy emisji i konwersji optoelektronicznej. Całkowity mechanizm można opisać jako kaskadę fizycznych transformacji energii: od depozycji energii promieniowania jonizującego, poprzez generację wzbudzenia w materiale scyntylacyjnym, aż do emisji fotonów i ich konwersji na energię elektryczną.

3.1. Depozycja energii promieniowania jonizującego

Pierwszym etapem jest oddziaływanie promieniowania (α , β , γ , neutrony) z materiałem scyntylacyjnym. Mechanizmy takie jak efekt fotoelektryczny, rozpraszanie Comptona oraz tworzenie par elektron-pozyton prowadzą do przekazania energii cząstkom wtórnym. W wyniku tych procesów powstają wysokoenergetyczne elektrony, które tracą energię poprzez jonizację i wzbudzenia sieci krystalicznej [Knoll 2010].

Energia zdeponowana w materiale prowadzi do powstania gęstej populacji par elektron-dziura oraz ekscytonów, które stanowią podstawowy nośnik energii w dalszych etapach konwersji.

3.2. Transport energii i procesy relaksacyjne

Powstałe nośniki energii ulegają relaksacji poprzez:

- rozpraszanie fononowe,
- migrację ekscytonów,
- transfer energii do centrów luminescencyjnych (domieszek aktywnych).

W tym etapie zachodzi konkurencja między procesami promienistymi i niepromienistymi. Straty energii wynikają m.in. z pułapkowania nośników oraz procesów rekombinacji niepromienistej, co ogranicza wydajność scyntylacji [Yanagida 2018].

3.3. Wzmocnienie plazmoniczne emisji

Wprowadzenie nanostruktur metalicznych prowadzi do wzbudzenia plazmonów powierzchniowych, które umożliwiają silną lokalizację pola elektromagnetycznego w skali nanometrycznej. W efekcie dochodzi do zwiększenia lokalnej gęstości stanów elektromagnetycznych (LDOS), co bezpośrednio wpływa na dynamikę emisji.

Sprzężenie emitera z cząstką plazmoniczną skutkuje:

- zwiększeniem szybkości emisji,
- modyfikacją widma emisji,
- zwiększeniem efektywności sprzężenia z dalszymi elementami układu.

Jednocześnie należy uwzględnić konkurencyjne straty ohmiczne w metalach, które mogą prowadzić do wygaszania emisji w przypadku zbyt silnego sprzężenia [Maier 2008].

3.4. Wzmocnienie emisji poprzez efekt Purcella

Efekt Purcella, polegający na modyfikacji szybkości emisji spontanicznej poprzez zmianę lokalnej gęstości stanów elektromagnetycznych, stanowi istotne narzędzie optymalizacji właściwości radioluminescencyjnych materiałów perowskitowych. Wprowadzenie struktur rezonansowych lub nanofotonicznych umożliwia skrócenie czasu zaniku emisji oraz zwiększenie wydajności scyntylacji, co ma kluczowe znaczenie w zastosowaniach detekcyjnych wymagających wysokiej rozdzielczości czasowej, takich jak systemy PET czy szybkie detektory promieniowania jonizującego.

3.5. Sprawność konwersji

Całkowitą sprawność konwersji (η_{tot}) można zapisać jako iloczyn sprawności poszczególnych etapów:

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{dep}} \cdot \eta_{\text{scynt}} \cdot \eta_{\text{opt}} \cdot \eta_{\text{PV}}$$

- η_{dep} – efektywność depozycji energii,
- η_{scynt} – wydajność scyntylacji,
- η_{op} – efektywność ekstrakcji światła,
- η_{PV} – sprawność konwersji fotowoltaicznej.

Mechanizm konwersji w analizowanym układzie można podsumować jako:

- promieniowanie jonizujące
- → ekscytacje elektronowe
- → scyntylacja (wzmocniona plazmonicznie)
- → emisja (wzmocnienie Purcella)
- → konwersja PV.

Integracja nanofotoniki z klasycznymi materiałami scyntylacyjnymi umożliwia kontrolę procesów emisji na poziomie nanometrycznym, co stanowi fundament dla rozwoju nowej generacji nuklearnych konwerterów energii.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiona analiza nuklearnego konwertera energii opartego na scyntylatorze, wzmocnieniu plazmonicznym oraz efekcie Purcella wskazuje, że integracja tych trzech obszarów prowadzi do jakościowej zmiany w podejściu do konwersji energii promieniowania jonizującego.

Jednocześnie przeprowadzona analiza ujawnia istotne ograniczenia technologiczne. Do najważniejszych należą straty ohmiczne w metalach, prowadzące do wygaszania emisji, oraz konieczność precyzyjnego dopasowania spektralnego i geometrycznego układu. Optymalizacja odległości emiter-nanostruktura, kontrola geometrii oraz dobór materiałów pozostają kluczowymi wyzwaniami inżynierskimi.

W perspektywie dalszych badań szczególne znaczenie mają:

- (i) rozwój niskostratnych materiałów plazmonicznych,
- (ii) projektowanie struktur o ekstremalnie małej objętości modowej i wysokim współczynniku Q/V ,
- (iii) integracja z nowoczesnymi detektorami półprzewodnikowymi oraz ogniwami fotowoltaicznymi,

- (iv) rozwój modeli teoretycznych uwzględniających efekty nielokalne i kwantowe.

Proponowany nuklearny konwerter energii z plazmonicznie wzmocnioną emisją scyntylacyjną i efektem Purcella przede wszystkim zwiększa wydajność przetwarzania promieniowania na sygnał optyczny/elektryczny. Przykładowe, możliwe zastosowania nuklearnego konwertera energii z plazmonicznie wzmocnioną emisją scyntylacyjną i efektem Purcella przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Przykładowe, możliwe zastosowania nuklearnego konwertera energii z plazmonicznie wzmocnioną emisją scyntylacyjną i efektem Purcella

Opis	Zastosowania
Zasilanie długowiecznych systemów (alternatywy dla klasycznych RTG).	Zasilanie: - czujników rozproszonych, - urządzeń w trudno dostępnych miejscach, - systemów działających latami bez serwisu.
Detekcja i monitoring promieniowania. Umożliwiają szybszą odpowiedź dzięki plazmonicznemu wzmocnieniu sygnału skróceniu czasu emisji przez efekt Purcella.	Do wykrywania materiałów jądrowych. Jako systemy wczesnego ostrzegania. Do monitoringu skażeń. Czułe detektory (np. granice, porty, infrastruktura krytyczna).
Systemy kosmiczne i wojskowe satelity (poprzez odporność na ekstremalne warunki takie jak promieniowanie, czy brak serwisu).	Stabilne źródła energii i/lub detekcji dla: - satelitów obserwacyjnych, - sond wojskowych, - systemów komunikacyjnych.
Zaawansowane sensory i obrazowanie.	Wysokorozdzielcze detektory promieniowania (lepszta identyfikacja izotopów). W systemach inspekcji (szybsze obrazowanie).
Elektronika odporna na promieniowanie.	Integracja z układami działającymi w środowiskach nuklearnych, kosmicznych, czy wysokiego promieniowania.

LITERATURA

1. Iwan A., Pellowski W., Bogdanowicz K.A., 2021, Conversion of radiophotoluminescence irradiation into electricity in photovoltaic cells. A review of theoretical considerations and practical solutions, *Energies*, 14(19), 6186.
2. Iwan A., Bogdanowicz K.A., Pich R., Gonciarz A., Pellowski W., Miedziak J., Przybył W., 2024, Photovoltaic cells and scintillators towards carbon footprint reduction: Advantages and challenges for ecological safety. *Materials*, 17(23), 5909.

3. Purcell, E.M., 1995, Spontaneous emission probabilities at radio frequencies. *Confined electrons and photons: new physics and applications*. Boston, MA: Springer US, 839.
4. Sychov M, Kavetsky A, Yakubova G, Walter G, Yousaf S, Lin Q, Chan D, Socarras H, Bower K., 2008, Alpha indirect conversion radioisotope power source. *Applied Radiation and Isotopes*. 66(2), 173.
5. Jiang T, Li S, Yao W, Han L, Zhang L, Li X, Zhang L, Tang X, Li X, San H., 2025, High-efficiency 90Sr radio-photovoltaic cells based on waveguide light concentration structure. *Light: Science & Applications*. 14(1), 214.
6. Yanagida T., 2018, Inorganic scintillating materials and scintillation detectors. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 94(2), 75.
7. Knoll G.F., 2010, *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons
8. Shahbazyan T.V., 2023, Purcell factor for plasmon-enhanced metal photoluminescence. *The Journal of Physical Chemistry C*, 127(12), 5898.
9. Kurman Y., Lahav N., Schuetz R., Shultzman A., Roques-Carmes C., Lifshits A., ... & Kaminer, I., 2024, Purcell-enhanced X-ray scintillation. *Science Advances*,
10. Hell E., Knüpfner W., Mattern D., 2000, The evolution of scintillating medical detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 454.
11. Terranova M.L., 2022, Nuclear batteries: Current context and near-term expectations, *International Journal of Energy Research*, 46, 14, 19368.
12. Pellowski W., Gonciarz A., Miedziak J., et al., 2026, From SiGe solidification to flexible photovoltaic fibers for military applications: Current status and development prospects, *Energies*, 19, 654.
13. Maier S. A., 2007, *Plasmonics: fundamentals and applications*, New York: Springer.

ACKNOWLEDGEMENTS

Podziękowania dla Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Ministerstwa Obrony Narodowej za współfinansowanie projektu nr: 49/WNB/27/SMON – „Kaskadowy konwerter promieniowania jonizującego na bazie luminoforu i ogniwa fotowoltaicznego” (2025/2026).

NUCLEAR ENERGY CONVERTER WITH PLASMONIC SCINTILLATION ENHANCEMENT AND THE PURCELL EFFECT

Abstract

Conversion of ionizing radiation into usable electrical energy is a pioneering technology for hybrid energy harvesting, with potential applications in space missions, remote sensing, and specialized energy systems. We present a conceptual framework for a nuclear-plasmon-photovoltaic (NPV) energy converter that integrates a radioactive source, a scintillation medium enriched with plasmonic nanostructures, and a photovoltaic (PV) cell optimized for visible light absorption. The plasmonic structures act as local concentrators of the electromagnetic field, increasing scintillation efficiency and spectral matching to the PV cell. The NPV converter model is based on a multidisciplinary approach combining nuclear physics, plasmonic nanophotonics, and photovoltaics, paving the way for compact, high-efficiency energy sources in environments where conventional energy harvesting is cost-prohibitive.

Keywords: nuclear energy conversion, scintillation, plasmonic effect, photovoltaic cells

Piotr PIĄTKOWSKI*
Waldemar KUCZYŃSKI**
Ireneusz PIELECHA***

SYSTEM NAPĘDOWY POJAZDU ELEKTRYCZNEGO JAKO ŹRÓDŁO ENERGII UŻYTKOWEJ W WARUNKACH TERENOWYCH

W artykule przedstawiono kluczowe możliwości wykorzystania systemów napędowych pojazdów z napędem elektrycznym stanowiących źródło energii dla celów poza transportowych. Dokonano analizy budowy systemu napędowego w aspekcie efektywności funkcjonowania oraz możliwości współpracy z zewnętrznymi odbiornikami energii. Przedstawiono przykłady istniejących rozwiązań systemów umożliwiających przepływ energii do i z pojazdu zarówno w warunkach terenowych jak i występującej infrastruktury energetycznej. Poddano analizie wybrane właściwości techniczno-eksploatacyjne pojazdów z elektrycznym systemem napędowym o terenowych lub uterenowionych właściwościach technicznych i trakcyjnych, a w tym także wykorzystanie tych pojazdów, jako transportery dla systemów dronowych.

Słowa kluczowe: źródło energii, teren, pojazd, właściwości

1. WPROWADZENIE

Decarbonizacja oraz rozwój zielonych technologii wojskowych ma duży wpływ nie tylko na rozwój aktywnych badań w dziedzinie nowoczesnych systemów napędowych pojazdów, systemów energetycznych, komunikacji bezprzewodowej, ale także na ich cywilne zastosowania przemysłowe. Przykładami są technologie sieciowe i algorytmy efektywności energetycznej, a także protokoły, zapewnianie jakości usług, itp. Wszystkie te zagadnienia wymagają zastosowania wielu rozwiązań tech-

* Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki

** Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki

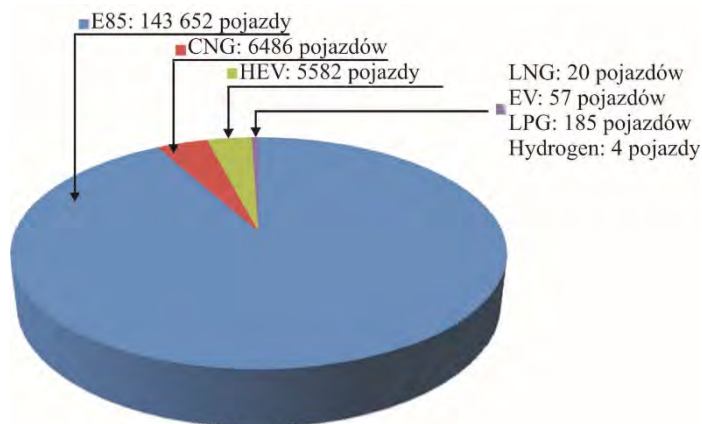
*** Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

nicznych takich, jak różnorodne sieci, systemy zasilania i urządzenia. Jeśli chodzi o zielone technologie wojskowe, ich główne cechy obejmują oferowanie systemu rozwiązującego następujące problemy operacyjne [Miličević 2023]:

- wysokie koszty wdrożenia,
- wysokie wydatki związane z zakupem, instalacją i konserwacją,
- redukcja emisji toksycznych substancji oraz
- niskie wskaźniki wytwarzania energii w porównaniu ze zużyciem paliwa.

Możliwości zmniejszenia zużycia paliwa przez pojazdy i przejścia na paliwa alternatywne stanowi istotną część oceny oszacowania potencjalnych oszczędności we flocie w oparciu o zalecenia, takie jak wymiana pojazdów, redukcja wielkości floty lub wykorzystanie paliw alternatywnych [Booth i inni 2010].

Niektóre możliwe opcje lub strategie wymiany pojazdów obejmują zakup hybrydowych pojazdów elektrycznych (HEV), zwłaszcza jeśli nie są dostępne pojazdy napędzane paliwem alternatywnym i/lub pojazdami napędzanymi paliwem alternatywnym (AFV). Przykład ilościowy określający liczbę pojazdów we flocie ponad 600 000 pojazdów rządowych Stanów Zjednoczonych zasilanych w sposób niekonwencjonalny przedstawiono na rysunku 1.

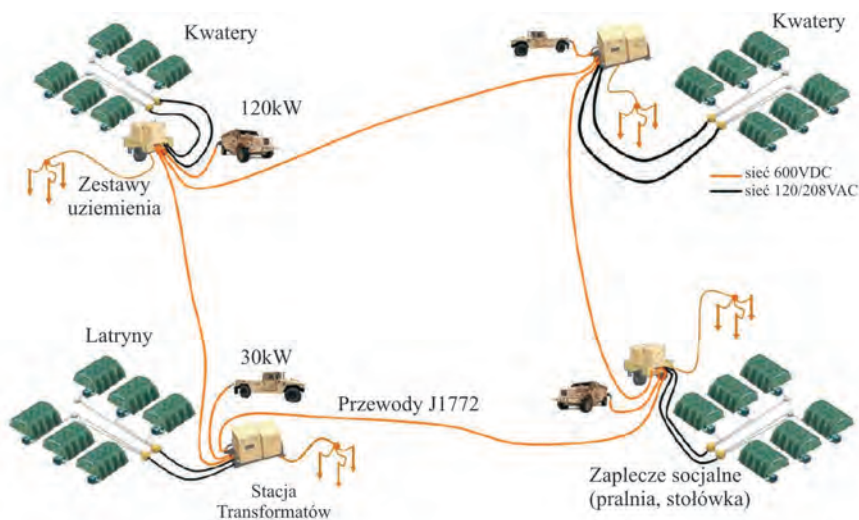


Rys. 1. Liczbowy podział pojazdów zasilanych niekonwencjonalnie we flocie pojazdów rządowych Stanów Zjednoczonych [Booth 2010]

Można zauważyć, że alternatywne systemy napędowe stanowiły około 25% pojazdów we flocie rządu USA. Stąd, można też wnioskować, że jest to istotny element ze względu na dywersyfikację źródeł zasilania i paliw zużywanych na potrzeby rządowe, co także stanowi o odporności na zakłócenia dostaw nośników energii.

Tu także należy wskazać, że w analizach dywersyfikacji energii w sieci wojskowej lub na potrzeby wojska także armia ChRL wprowadza szereg innowacyjnych technologii zastępujące konwencjonalne systemy konwersji energii, gdzie szczególną uwagę zwraca się na energię słoneczną oraz ogniwa paliwowe reprezentujące możliwość ciągłej pracy [Ling-Tuan, 2021].

Innym elementem stanowiącym współcześnie o rozwoju systemów energetycznych na potrzeby terenowe, a w tym także wojskowe, stanowią lokalne sieci energetyczne oraz mobilne systemy zasilania. W opracowaniu wykonanym na zlecenie Departamentu Energii USA [Hoffman i inni, 2025] zamieszczono szereg informacji o kluczowych elementach mikro sieci elektroenergetycznych począwszy od ich planowania i projektowania, po użytkowanie i ochronę. To pozwala sądzić, że współcześnie mikro sieci energetyczne stanowią istotną rolę w realizacji zadań terenowych i coraz częściej zwraca się uwagę na konieczność uzyskania dostawy energii w warunkach ograniczonej infrastruktury w sytuacjach krytycznych [Razzaque i inni 2025]. Taka sieć, często cechuje się tym, że istotnie jest odcinkiem klasycznej sieci elektroenergetycznej na odcinku dystrybucyjnym o ograniczonej, do niezbędnego minimum (źródła energii, stacje rozdzielcze i transformatorowe, okablowanie), infrastrukturze. Przykład mikro sieci elektroenergetycznej przedstawił rysunek 2.



Rys. 2. Przykład mikro sieci obozu wojskowego z wykorzystaniem zestawów mobilnych systemów zasilania [Masrur i inni 2018]

Mikro sieć elektronenergetyczna (rys. 2) stanowić może, oprócz źródła energii dla bazy/obozu wojskowego, stanowić także źródło energii dla stacji ładowania systemów napędowych pojazdów (załogowych jak i bezzałogowych) wykorzystywanych do realizacji zadań terenowych [Li 2024].

Istotnymi elementami mikro sieci są źródła energii, które oprócz swoich funkcji konwersji energii muszą cechować się także mobilnością terenową. Mobilność terenowa źródeł energii może wiązać możliwości transportu nośnika (najczęściej paliwa) lub też wykorzystanie transportera (pojazdu) i jego systemu napędowego do celów energetycznych. Takie możliwości są już obecnie realizowane w systemach cywil-

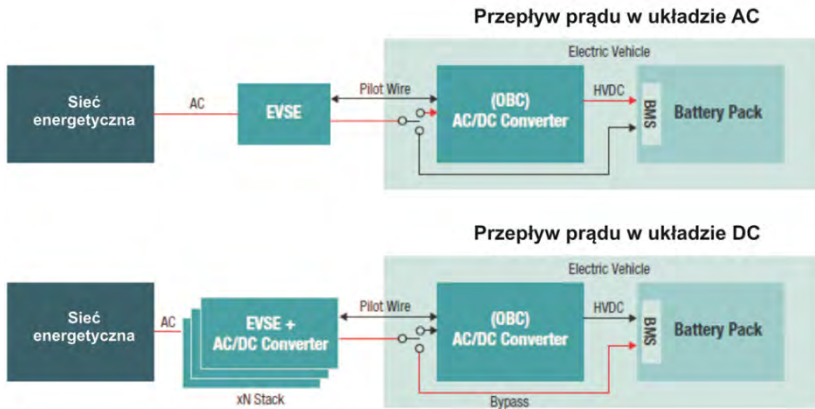
nych najczęściej na poziomie lokalnym (domowym), jak i na prowadzone są prace nad tym, aby było to możliwe także na większą skalę w układzie pojazdów flotowych [Grzesiak i inni 2012, Pawlos i Zadrożny 2024].

Główną cechą umożliwiającą zastosowanie pojazdów, jako źródła energii dla mikrosieci elektroenergetycznych jest możliwość pozyskiwania energii z pokładu pojazdu lub dostęp zewnętrznego odbiornika do energii zgromadzonej na jego pokładzie. Takie możliwości mogą zapewnić pojazdy wyposażone w niekonwencjonalny system napędowy w postaci napędu hybrydowego i elektrycznego posiadające funkcję dwukierunkowego przepływu energii elektrycznej, tzw. V2G (*vehicle – to – grid*) lub rozwiązań pozwalających na odbiór energii z pojazdu, tzw. V2L (ang. *vehicle – to – load*) lub V2H (ang. *vehicle – to – home*). Rozwiązania takie są obecnie już dostępne na rynku pojazdów cywilnych, jak i rozwiązań militarnych, choć ciągle nie są to rozwiązania powszechne.

2. DWUKIERUNKOWY PRZEPIY W ENERGII

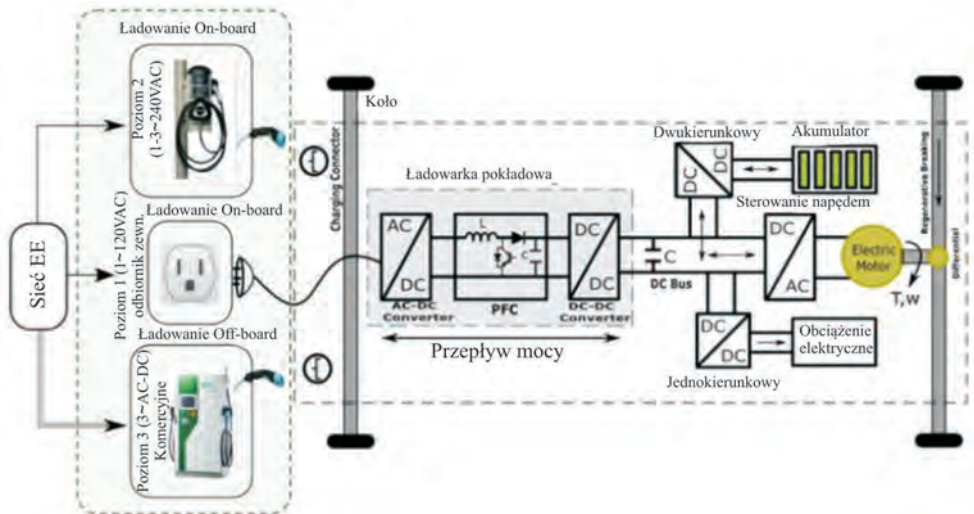
Dwukierunkowy przepływ energii elektrycznej jest kluczowym elementem cechy konstrukcyjnej systemu napędowego pojazdów typu hybrydowego (PHEV) oraz pełni elektrycznego (BEV) do pełnych zastosowań sieciowych. Jednocześnie jest to także jeden z elementów rozwoju konstrukcji pojazdów do celów współpracy ze wznętrznymi systemami zarządzania i sterowania [Rohde&Schwarz, 2018], jak inteligentne systemy transportowe (ich funkcjonalności) jak i sieciami typu smart grid (smart home) realizującymi zadania gospodarowania energią.

Związane jest to z procesem ładowania akumulatora pojazdu, które realizowane może być na sposób zastosowania prądu o napięciu stałym, jak i przemiennym. W obu przypadkach struktura przepływu energii z sieci do akumulatora jest jednak różna – co przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat przepływu prądu podczas ładowania akumulatora pojazdu elektrycznego w trybie prądu o napięciu przemiennym (AC) oraz stałym (DC)

W trybie ładowania prądem o napięciu przemiennym (AC), prąd przepływa z sieci poprzez ładowarkę do pokładowego konwertera, gdzie po wyprostowaniu, płynie dalej do akumulatora. W przypadku ładowania prądem stałym etap ten jest pomijany na pokładzie pojazdu i prąd niemal bezpośrednio trafia do akumulatora. Natomiast system pokładowy umożliwiający dwukierunkowy przepływ prądu został przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Architektura przepływu mocy jednokierunkowej i dwukierunkowej w technologii V2G z mocą znamionową ładowarki [Habib i inni, 2018]

W trybie V2G moc przepływa w obu kierunkach i może być wykorzystana do redukcji zapotrzebowania na obciążenie szczytowe oraz zapewnienia zmiennych reak-

cji i regulacji napięcia-fazy w sieci. Jednak dwukierunkowy tryb pracy wymaga dodatkowych stopni przetwornicy AC/DC i DC/DC (rys. 4). Tryb AC/DC działa w obu kierunkach podczas ładowania i rozładowywania pojazdu elektrycznego. Stopień DC/DC jest wymagany do prawidłowej kontroli prądu i działa jako przetwornica zmniejszająca i zwiększająca napięcie podczas faz ładowania i rozładowywania. Te dynamiczne stopnie elektroniki mocy umożliwiają integrację odnawialnych źródeł energii rozproszonej. W dwukierunkowym trybie V2G proces ładowania i rozładowywania skraca żywotność systemu magazynowania energii i wymaga złożonego regulatora ładowania i urządzeń sterujących [Dogger i inni 2011].

Taki układ w połączeniu z możliwością zastosowania silnika spalinowego wraz z generatorem prądu (tzw. range-extenderem) może stanowić o realnej możliwości zastosowania pojazdu z systemem napędu typu PHEV, jako terenowego źródła energii elektrycznej. Takim źródłem dodatkowej energii może być silnik spalinowy lub w nowszych zastosowaniach także choćby ogniwo paliwowe [Fragiacomo i inni 2022]

3. POJAZDY HYBRYDOWE O WŁAŚCIWOŚCIACH TERENOWYCH

Wśród obecnie produkowanych pojazdów, szczególnie segmentu SUV, można znaleźć wiele rozwiązań systemów napędowych typu PHEV z dwukierunkowym przepływem energii elektrycznej takich producentów jak choćby Porsche, BMW, Ford czy Renault. Jednak pojazdy do zastosowań terenowych powinny charakteryzować się cechami konstrukcyjnymi jak i trakcyjnymi umożliwiającymi im pokonywanie wielu przeszkód (tzw. dzielność terenowa). Do kluczowych z nich należą; układ napędu na więcej niż jedną oś (najlepiej stały z możliwością regulacji siły napędowej), kąt natarcia, kąt zejścia, kąt rampowy, wartość minimalnego prześwitu, naciski osi czy też głębokość brodzenia. Z kolei na drugim biegunie można postawić cechy użytkowe takie jak ładowność czy też zasięg. Stąd wśród wymiennych cech wiele stanowić będzie o przeciwnych relacjach parametrycznych, a z tego powodu także różne położonych ekstremach dla optymalnego wyboru. Główną wadą takich pojazdów o napędzie hybrydowym (PHEV) może być jego masa własna, ładowność i zasięg – co istotnie wpływa na ocenę możliwości zastowania takie pojazdu w warunkach terenowych.

Tabela 1

Zestawienie wybranych pojazdów terenowych z funkcją V2G lub V2L/H

Marka i model i typ pojazdu	Właściwości				
	Maks. masa całk. [kg]	Ładowność [kg]	Maks. moc ładowania (AC) [kW]	Maks. moc oddawana (AC) [kW]	Maks. pojemność akumulatora [kWh]
Ford F-150 Lighting BEV V2G	3500	850	19,2	17,6	131
Kia EV9 GT BEV V2L	3240	651	3,6	3,6	99,8
Chevrolet Silverado EV Crew Cab BEV V2H	3900	816	19,2	10,2	200
GMC Sierra EV Denali BEV V2H	4076	700	19,2	10,2	215
Tesla Cybertruck BEV V2L	3113	1134	11,0	11,5	130

Ponadto, mając na uwadze jego dodatkową funkcję – zasilanie lokalnej sieci elektroenergetycznej – należy oczekiwać możliwie pojemnego zasobnika (akumulatora), efektywnego konwertera oraz możliwości uzupełnienia energii ze źródła zewnętrznego. W tabeli 1 zestawiono pojazdy dostępne obecnie na rynku o cechach terenowych oraz posiadające funkcję dwukierowego przepływu energii V2G lub V2L/H.

Biorąc po uwagę zestawienie zawarte w tabeli 1 można wnioskować, że wszystkie przedstawił tam pojazdy zostały wyposażone w typowy elektryczny układ napędowy (zazwyczaj typu dualmotor). To wskazuje, że obecnie na rynku samochodów cywilnych nie występują pojazdy, które posiadałyby zdolności wymiany energii wraz z jej pozyskiwaniem na pokładzie pojazdu. Tylko Tesla, wśród wymienionych, posiada możliwość zainstalowania range-extendera, co finalnie może też służyć zasilaniu odbiorników zewnętrznych.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Pojazdy stosowana do prac i działań w warunkach terenowych powinny oprócz swoich cech trakcyjnych zapewniać obecnie także element istotny dla wykonywanych zadań – nośnik energii. Ten w realnych warunkach jest często trudno dostępny a także jego wygenerowanie (konwersja) może być związana z efektami wpływającymi na możliwości przetrwania. Stąd, hałas i ciepło towarzyszące w wielu

przypadkach standardowym generatorom energii elektrycznej stanowi o lokalizacji organizacji lub obiektu, gdzie jest on zastosowany. Mając na uwadze powyższe można wnioskować, że;

1. Współczesne pojazdy wyposażone w pokładowy system magazynowania energii mogą stanowić efektywną formę źródła energii, szczególnie w warunkach terenowych.
2. Dostępne technologie pozwalają na wykorzystanie energii zgromadzonej w magazynie pokładowym pojazdu – lecz w większości przypadków to pojazdy elektryczne typu BEV (and. *Battery Electric Vehicle*), co znacząco ogranicza ich możliwości użytkowe zarówno pod względem transportowym, jak i energetycznym.
3. Rozwój pojazdów z układem napędowym opartym o technologię typu PHEV z systemem dwukierunkowej wymiany energii na poziomie V2G lub V2L/H, szczególnie wyposażanych w system ogniw paliwowych oraz możliwość współpracy z systemami PV, pozwoli na ich efektywne zastosowanie jako źródła energii w warunkach jej ograniczonego dostępu, a jednocześnie umożliwi uzyskać ich mobilność w warunkach terenowych.
4. Pojazdy PHEV wyposażone w infrastrukturę dokowania oraz porty ładowania mogą spełniać funkcję efektywnych transporterów dla bezzałogowych statków powietrznych jak i pojazdów naziemnych i wodnych stanowiąc dla nich bazę energii jak i sterowania.

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. Miličević, Zoran M.; Bojković, Zoran S., 2023, Military green technology: Present and future *Vojnotehnicki glasnik/Military Technical Courier*, vol. 71, no. 1,
2. Masrur M. A., Skowronska A. G., Hancock J., Kolhoff S.W., McGrew D.Z., Vandiver J.C., 2018, Military-Based Vehicle-to-Grid and Vehicle-to-Vehicle Microgrid—System Architecture and Implementation, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Volume: 4, Issue: 1, March, DOI: 10.1109/TTE.2017.2779268
3. Yu M., 2024, Designing UAV Charging Framework for Forest Area with Microgrid, *Energies*, 17(23), 6109; <https://doi.org/10.3390/en17236109>
4. Habib, S.; Khan, M.M.; Abbas, F.; Tang, H., 2018 Assessment of electric vehicles concerning impacts, charging infrastructure with unidirectional and bidirectional chargers, and power flow comparisons. *Int. J. Energy Res.* 42, 3416–3441
5. Dogger, J.D.; Roossien, B.; Nieuwenhout, F.D.J., 2011, Characterization of Li-Ion Batteries for Intelligent Management of Distributed Grid-Connected Storage. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2011, 26, 256–263
6. Pawlos W.P., Zadrozny K., 2024, Electromobility in Poland as a challenge for modern transport, *Systemy Logistyczne Wojsk, Zeszyt 61 (2024)*, ISSN 1508-5430, s. 105-128, DOI: 10.37055/sl/w/203439

7. Fragiacompo P., Genovese M., Piraino F., Corigliano O., and De Lorenzo G., 2022, Hydrogen-Fuel Cell Hybrid Powertrain: Conceptual Layouts and Current Applications, *Machines*, 10, 1121. <https://doi.org/10.3390/machines10121121>
8. Razzaque M.A., Khadem S.K., Patra S., Okwata G. and Noor-A-Rahim Md., 2025, Cybersecurity in Vehicle-to-Grid (V2G) Systems: A Systematic Review, Elsevier

Opracowania i raporty z badań

1. Booth S., Barnett J., Burman K., Hambrick J., Westby R., 2010, Net Zero Energy Military Installations: A Guide to Assessment and Planning, Technical Report NREL/TP-7A2-48876, August
2. Hoffman M., Cruz M., Kerby J., Siddiqui S., Tan J., De La Rosa M., 2025, Microgrid Handbook for Army Resilience A Technical Review, Pacific Northwest National Laboratory, October
3. Ling-Tuan L., 2021, China's Military Development of Alternative Energy, Report on the Defense Technology Trend Assessment—Assessment of the New Generation of Chinese Communist Party's Military Technology, ch. 12, p 151-158
4. Rohde&Schwarz, 2018, Introduction to the vehicle-to-everything communications service V2X feature in 3GPP release 14 White paper

ELECTRIC VEHICLE DRIVE SYSTEM AS A SOURCE OF USABLE ENERGY IN TERRAIN CONDITIONS

Abstract

This article presents key opportunities for using electric vehicle drive systems as a source of energy for non-transport purposes. The drive system's design is analyzed in terms of operational efficiency and the possibility of interoperability with external energy receivers. Examples of existing system solutions enabling energy flow to and from the vehicle, both in off-road conditions and within the existing energy infrastructure, are presented. Selected technical and operational characteristics of electric vehicles with off-road or off-road technical and traction properties are analyzed, including their use as transporters for drone systems.

Keywords: energy source, off-road terrain, vehicle, properties

Mirosław Płomiński*
Wojciech Żurawski**
Marcin Sienicki***

REAKTYWNE DZIAŁANIA SZRP W PROCESIE INWESTYCJI ENERGETYCZNYCH ZWIĄZANYCH Z BUDOWĄ MORSKICH FARM WIATROWYCH. SYSTEMOWA ODPOWIEDŹ PAŃSTWA POLSKIEGO NA ATAK HYBRYDOWY NA SYSTEMY NAWIGACJI SATELITARNEJ

Transformacja energetyczna w tym inwestycje na Morzu Bałtyckim, takie jak budowa Morskich Farm Wiatrowych (MFW), przyczyniły się do nawiązania intensywnej współpracy pomiędzy nauką, gospodarką i obronnością. Artykuł opisuje, jak badania prowadzone na potrzeby misji kosmicznych i zadania realizowane przez Zarząd Planowania i Programowania Rozwoju Sił Zbrojnych – P5 oraz Departament Infrastruktury w Ministerstwie Obrony Narodowej zostały wykorzystane przy opracowaniu sposobu zastosowania technicznych środków kompensujących przez Inwestorów Morskich Farm Wiatrowych oraz przygotowania koncepcji Systemu Ochrony Usługi Krytycznej GNSS (SOUKG) – rozproszonej sieci sensorów lądowych i morskich wykrywających zakłócenia sygnałów satelitarnych. Artykuł przedstawia jak pomysły i koncepcje wykute w gabinetach polskich sztabów wojskowych stały się rdzeniem paneuropejskiego systemu świadomości sytuacyjnej.

Autorzy przedstawiają zarys i wyniki procesu decyzyjnego, który uwzględnił wymagania militarne w harmonogramie inwestycji energetycznej MFW istotnych dla transformacji energetycznej. Opisano architekturę SOUKG oraz sposób integracji systemu z istniejącą siecią RTGMS Ministerstwa Cyfryzacji oraz SZMSG – Ministerstwa Finansów i Gospodarki oraz potencjał integracji z innymi projektami ESA i NATO, tworząc skalowalny i zintegrowany ekosystem projektowy.

Model działania łączący zasoby naukowe, przemysł offshore i instytucje rządowe – może służyć, jako wzorzec dla innych krajów NATO przygotowujących się na coraz bardziej wyrafinowane zagrożenia. Przyjęty przez Zarząd P-5 model działania zainicjował proaktywną współpracę z inwestorami w morskie farmy wiatrowe skutkującą pogodzeniem wzajemnie

* Sztab Generalny Wojska Polskiego, Zarząd Planowania i Programowania Rozwoju Sił Zbrojnych – P5.

** Ministerstwo Obrony Narodowej, Departament Infrastruktury.

*** Ministerstwo Obrony Narodowej, Departament Służby Zdrowia.

wykluczających się oczekiwań przedstawicieli podsystemów bezpieczeństwa narodowego, szczególnie podsystemu obrony narodowej, który jest zainteresowany rozwojem własnych zdolności operacyjnych i zachowaniem swobody działania oraz podsystemu bezpieczeństwa energetycznego zainteresowanego pozyskaniem na jak największym obszarze najtańszych Odnawialnych Źródeł Energii (OZE). Ponadto zainicjowano kaskadę innowacji i nowoczesnych rozwiązań do których poza SOUKG zaliczyć należy koncepcję budowy „ładowego GNSS”, systemu całkowicie odpornego na zakłócenia GNSS, które obecnie stosuje Federacja Rosyjska.

Działanie SZRP nie tylko wpisało się w potrzeby innych państw, które dotknięte problemem zakłóceń GNSS zwróciły się do Komisji Europejskiej o udzielenie pomocy i podjęcie działań, ale również spotkały się z aprobatą tego rozwiązania, które może służyć wzmocnieniu odporności i niezależności technologicznej UE.

Podsumowaniem i uznaniem trafności oraz dalekowzroczności działań podejmowanych przez Zespół Zadaniowy kierowany przez Zastępcę Szefa Zarządu P-5 SGWP są wnioski oraz inicjatywy z konferencji międzynarodowych i międzyresortowych, które odbyły się w dniach 30 czerwca, 08 sierpnia, 09 września i 22 września 2025 r. z udziałem przedstawicieli MON, ZZ SGWP P-5/P-6, WBZC, SSH SZ RP, RCB, MC, Instytut Łączności – PIB, MFiG, MSWiA, SG, LPR, POLSA, GUGiK, Centrum Badań Kosmicznych PAN. Za kluczowe o charakterze strategicznym należy uznać:

- powołanie przez MON, MC, MFiG, POLSA, RCB, GUGiK Programu Polska Tarcza PNT opartego o rdzeń SOUKG i uznanie programu jako systemowej odpowiedzi państwa polskiego na hybrydowe działania Federacji Rosyjskiej,
- opfacyowaniu przez MON, MC, GUGiK fiszki projektowej rozwijającej jeden z modułów ww. program,
- zarekomendowaniu przez Komisję Europejską European Commission DG Joint Research Centre (JRC) skalowania rozwiązań Programu Polska Tarcza PNT na przestrzeń państw UE i NATO i przystąpienie do projektu Komisji Europejskiej EU UTC backbone.

Szczególnym i ważnym wynikiem trwającego od kilkunastu miesięcy wysiłku planistycznego jest utworzenie przestrzeni, w której można rozwijać projekty z zakresu bezpieczeństwa i obronne i bardzo sprawnie wykorzystywać wsparcie finansowe m.in.

- wzmocnienia odporności Krajowego Systemu Cyberbezpieczeństwa,
- wzmocnienia Narodowego Programu Odstraszania i Obrony „Tarcza Wschód”,
- unijnego programu obronnego Security Action for Europe (SAFE).

Słowa kluczowe: sztuka wojenna, zakłócenia gnss, działania hybrydowe, cyberbezpieczeństwo

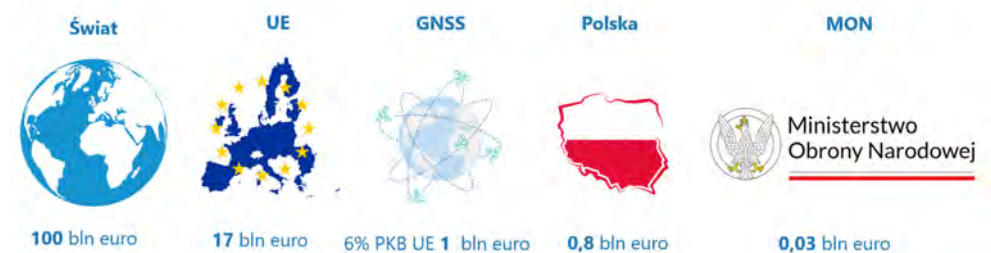
1. WPROWADZENIE

1.1. Cel artykułu

W niniejszym opracowaniu:

- opisano reaktywne działanie Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej w obliczu destabilizacji bezpieczeństwa i rozpoczęcia działań hubrydowych,
- opisano proaktywne działanie Zespołu Zadaniowego powołanego przez Ministra ON umożliwiające wnoszenie Morskich Farm Wiatrowych bez uszczerbku dla posiadanych bądź przyszłych zdolności operacyjnych Sił Zbrojnych RP,
- przedstawiono znaczone technologie GNSS dla gospodarki Świata, gospodarki krajów EU oraz dla skuteczności projekcji zachodniej siły militarnej (Rys. 1),
- przedstawiono jak przeszkody i utrudnienia infrastrukturalne zostały wykorzystane jako sposobność wojskowa i jak SZRP połączyły w spójny program technologiczny potrzeby obronne i transformację energetyczną,
- przedstawiono inicjatywę MON i skonstruowanie przestrzeni dla inicjatyw z dziedziny bezpieczeństwa i obronności, co ustanowiło pole do racjonalnego i sprawnego wykorzystania środków np. unijnego programu obronnego Security Action for Europe (SAFE) oraz Funduszy Europejskie na Rozwój Cyfrowy 2021-2027, Działanie FERC,
- przedstawiono architekturę i możliwości SOUKG oraz jego integrację z siecią stacji referencyjnych ASG-EUPOS, które służą jako sensory stacjonarne dla systemu RTGMS i projektów kosmicznych.
- wskazano szersze implikacje dla polityki bezpieczeństwa NATO i gospodarki opartej na usługach PNT,
- pokazano jak myśl wojskowa staje się rdzeniem paneuropejskiego systemu świadomości sytuacyjnej.

Przyjęta perspektywa dowodzi, że ochrona GNSS nie jest jedynie zadaniem stricte technicznym, lecz wymaga skoordynowanego działania naukowców, przemysłu, regulacji prawnych i wojska – zwłaszcza w regionie, gdzie przeciwnik uzyskał i ciągle rozbudowuje zdolności A2/AD (Anti-Access/Area Denial).



Rys. 1. Udział technologii GNSS w PKB Świata, UE, w tym Polski oraz porównanie do budżetu MON [EUSPA,2024]

1.2. Transformacja energetyczna jako wyzwanie i szansa

Przedstawione w artykule przedsięwzięcia mają swój początek u zarania projektów budowy Morskiej Energetyki Wiatrowej w wyłącznej strefie ekonomicznej Rzeczypospolitej Polskiej. W początkowych latach ubiegłej dekady (2012-2013) wydano pierwsze decyzje lokalizacyjne, rozpoczynające procesy, które obecnie znajdują się w etapie terenowej realizacji. Plany budowy znacznych rozmiarów konstrukcji, ze względu na ich przewidywane negatywne oddziaływanie na systemy obronne wzbudziły poważne obawy Sił Zbrojnych RP, obawy były całkowicie uzasadnione i zostały skutecznie zakomunikowane. Ustawodawca zobowiązał zatem inwestorów [Uobm,2011], by skompensowali straty obronne poprzez działania mitygujące (kombinacja rozwiązań technicznych i organizacyjnych) uzgodnione z Ministrem Obrony Narodowej. Priorytet potrzeb obronnych został dodatkowo podkreślony warunkiem, że Morską farmę wiatrową i zespół urządzeń buduje się i eksploatuje z zapewnieniem potrzeb obronności państwa. Istotne w przepisach przywołanej ustawy jest wymóg, aby nie tylko na etapie budowy MFW inwestor dokonał jednorazowych mitygacji, ale, że ten proces ma obejmować również okres eksploatacji MFW, czyli przewidywany okres kilkudziesięciu lat. Obowiązek narzucony przez ustawodawcę na Inwestora (operatora) ma zatem charakter ciągłego wieloletniego zobowiązania.

Ponadto analiza wpływu MFW i zespołu urządzeń na systemy obronne państwa oraz metody kompensacji zgodnie z wolą ustawodawcy powinny zostać przedstawione w opracowaniu eksperckim, które po zatwierdzeniu w trybie administracyjnym przez Ministra Obrony Narodowej umożliwi kontynuowanie inwestycji.

Nałożenie na inwestorów obowiązków w aktach prawnych w randze ustawy, które zrealizowano już na etapie tworzenia podstaw do inwestycji w Morskie Farmy Wiatrowe zabezpieczyło istotne interesy obywateli poprzez zobowiązanie podmiotów odpowiedzialnych za inwestycje do długoterminowej współpracy z organami państwa, w szczególności z przedstawicielami Ministerstwa ON oraz Ministerstwa Spraw Wewnętrznych i Administracji. Należy podkreślić, że działo się to w okresie

sprzed rosyjskiej agresji na Ukrainę, wobec tego oczywistym jest, że perspektywa percepcji w tamtym okresie odbiegała od dzisiejszej a jednak podjęte na tak wczesnym etapie decyzje co do kierunku kompensacji utraconych zdolności Straży Granicznej i Sił Zbrojnych RP spowodowały, że pierwotne ogólne zapisy dokumentów prawodawczych z biegiem lat mogły zostać uszczegółowione, zweryfikowane i rozwinięte w oparciu o wiedzę praktyczną zdobytą podczas wymiany doświadczeń i praktycznej kooperacji z inwestorami.

Dodatkowo należy wskazać, że konieczność wspólnego (cywilno – wojskowego) realizowania interesów państwa podczas projektowania i budowy morskich farm wiatrowych spotkała się z pełnym zrozumieniem strony cywilnej, co nie było pierwotnie wcale takie oczywiste. Organy Rzeczypospolitej Polskiej w uzasadniony sposób sprecyzowały zobowiązania wobec inwestorów nie w oparciu o arbitralne ustalenia komórek organizacyjnych, lecz w pełni profesjonalne badania naukowe instytucji eksperckiej (Akademia Marynarki Wojennej). Wyniki tych badań, wraz z rekomendacjami zostały zebrane w Ekspertyzach Technicznych[†], które wraz z pozwoleniami na wznoszenie sztucznych wysp w odniesieniu do poszczególnych morskich farm wiatrowych stanowiły punkt startowy do szczegółowych uzgodnień uwzględniających charakterystykę geograficzną inwestycji oraz unikalne wymagania interesu państwa. Mając na względzie to, że powyższa problematyka jest pionierska w skali światowej i wymagała zastosowania rozwiązań niekonwencjonalnych prowadzono długotrwałe uzgodnienia z inwestorami najpierw na etapie projektowania inwestycji a następnie na etapie ich realizacji precyzując wymagania i szczegóły techniczne oraz rozwiązując pojawiające się problemy i wątpliwości. Zgodnie z Decyzją Ministra Obrony Narodowej w resorcie powołano *Zespół Zadaniowy do uzgodnień dotyczących stosowania technicznych środków kompensujących przez Inwestorów Morskich Farm Wiatrowych* kierowany przez Zastępcę Szefa Zarządu Pla-

* Jednolite wymagania w sprawie opracowania ekspertyz technicznych dla morskich farm wiatrowych zebrano w rozporządzeniu Ministra Obrony Narodowej z dnia 10 października 2022 r. w sprawie szczegółowego zakresu ekspertyz technicznych w zakresie oceny wpływu morskiej farmy wiatrowej i zespołu urządzeń służących do wyprowadzenia mocy na systemy obronności państwa oraz na system ochrony granicy państwowej na morzu, w którym w porozumieniu z Ministrem Spraw Wewnętrznych i Administracji określono szczegółowe zakresy ekspertyz technicznych mające na celu wskazanie zakresu negatywnego wpływu inwestycji w morskie farmy wiatrowe na systemy bezpieczeństwa Sił Zbrojnych RP oraz Straży Granicznej oraz rekomendacje do jego kompensacji. Na dalszym etapie przedstawiciele Sił Zbrojnych pod kierownictwem Zarządu Planowania i Prognozowania Rozwoju Sił Zbrojnych – P5 (Sztab Generalny Wojska Polskiego) wraz z Akademią Marynarki Wojennej wypracowały Wytyczne w zakresie metodyki i metodologii sporządzania ekspertyz do oceny wpływu morskiej farmy wiatrowej na systemy obronności państwa, które stanowią kompleksową podstawę do prowadzenia badań w celu opracowania ekspertyzy technicznej.

nowania i Programowania Rozwoju Sił Zbrojnych - P5, któremu powierzono kierowanie całokształtem przedsięwzięć związanych kompensacją utraconych zdolności operacyjnych przez Siły Zbrojne RP. Przystąpiono bezwzględnie do prac i dokonano niezbędnych korekt wynikających z postępu techniki wojskowej, zaistniałej sytuacji geopolitycznej oraz znacznego zwiększenia zakresu negatywnego oddziaływania przez organy Federacji Rosyjskiej na polskie systemy bezpieczeństwa, w tym rozpoczęcie wielkoskalowej demonstracji zdolności A2/AD (Anti-Access/Area Denial) oraz rozpoczęcie trwającego do dziś ataku AD na system GNSS. Zarząd Planowania i Programowania Rozwoju Sił Zbrojnych-P5 Sztabu Generalnego Wojska Polskiego, Departament Infrastruktury w Ministerstwie Obrony Narodowej oraz wybrane komórki i jednostki organizacyjne resortu obrony narodowej zostały zaangażowane w realizację przedsięwzięcia i w efekcie Inwestorzy I fazy MFW (Rys. 2) uzyskali zatwierdzenie przedłożonych analiz, planów i ekspertyz dotyczących środków technicznych i proceduralnych kompensujących MFW na systemy obronne przez Ministra Obrony Narodowej.

Początkowo w 2024 r. działano dość reaktywnie poprzez zorganizowanie cyklu warsztatów technicznych zarówno wewnątrz resortowych jak i z inwestorami, w trakcie których przedstawiono spójny plan dalszego działania zespołu. W późniejszych miesiącach przeprowadzono szereg spotkań indywidualnych z inwestorami podczas których wypracowano zasady współpracy w wymiarze holistycznym, w tym szczególnie kluczowe zasady komunikacji roboczej, która zapewnia efektywny i spójny dwustronny przepływ informacji oraz zainaugurowano wypracowywanie obustronnie satysfakcjonujących rozwiązań technicznych z zastrzeżeniem nadrzędności interesu Rzeczypospolitej Polskiej nad interesem inwestora. Prace zespołu obejmują wyspecyfikowane systemy bezpieczeństwa państwa[‡], które nie są zbiorem zamkniętym i podlegają ciągłej analizie i modyfikacji w zależności od bieżących lub przewidywanych potrzeb wynikających z realizacji konstytucyjnego obowiązku obrony niepodległości państwa i nienaruszalności jego granic przez Siły Zbrojne RP.

Ponieważ problematyka technologii GNSS jest wybitnie multidyscyplinarna a nawet multidziedzinowa, a problem zakłóceń stawał się bardzo istotny, Minister Obrony Narodowej wystąpił o wsparcie naukowe i techniczne do Ministrów, Rektorów, Komendantów, Dyrektorów: Wojskowej Akademii Technicznej, Politechniki Gdańskiej, Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, Instytutu Meteorologii

[‡] system zobrazowania radiolokacyjnego, system obserwacji technicznej (w tym Brzegowy System Obserwacji Marynarki Wojennej), system rozpoznania obrazowego, system rozpoznania hydroakustycznego, system morskiej łączności radiowej, system morskiej łączności podwodnej, system lotniczej łączności radiowej, system radionawigacji, system kontroli służb ruchu lotniczego Sił Zbrojnych RP (system zarządzania ruchem lotniczym Sił Zbrojnych RP), funkcjonowanie poligonów morskich, możliwości realizacji zadań przez Okrętowe Siły Ochrony Rejonu Strzelań w rejonie MFW podczas działalności ogniowej prowadzonej przez Siły Zbrojne, wykorzystanie przestrzeni powietrznej wydzielonej dla potrzeb lotnictwa wojskowego

i Gospodarki Wodnej poprzez Ministra Infrastruktury i Ministra Rozwoju i Technologii. Efektem było zorganizowanie w maju 2024 r. w Ministerstwie Obrony Narodowej technicznej konferencji, na którą przybyli naukowcy rangi światowej reprezentujący kompetencje niezbędne do rozwiązania problemu związanego z zakłóceniami GNSS oraz zorganizowanie na początku 2025 r. analogicznej konferencji w Ministerstwie Rozwoju i Technologii.

Kolejne miesiące to okres bardzo intensywnej pracy żołnierzy Zespołu Zadaniowego powołanego przez Ministra ON, który w efekcie doprowadził do zatwierdzenia przez Ministra Obrony Narodowej w dniu 28 marca 2025 r. „Wytycznych dla inwestorów MFW do projektowania Systemu Ochrony Usługi Krytycznej GPS/GNSS (SOUKG)”, które stanowiły załącznik do protokołu ustaleń nr 1/2025 z prac Zespołu Zadaniowego.

Zasadnicze elementy wspomnianego dokumentu zostaną omówione w dalszej części artykułu, jednakże można stwierdzić, że Inwestycje MFW dały przestrzeń do rozwoju systemu świadomości sytuacyjnej i ostatecznie okazały się nie przeszkodą a szansą na wzmocnienie systemów obronnych i uzyskanie głębszego wglądu w sytuację operacyjną. W efekcie coś co miało przeszkadzać wykorzystano jako pomoc. Siły Zbrojne przekuły sytuację niekorzystną militarnie na co najmniej akceptowalną, a w wielu aspektach wnosząca korzyść obronną.



Rys. 2a. Rozmieszczenie obszarów inwestycji fazy I MFW na Ławicy Słupskiej



Rys. 2b. Rozmieszczenie obszarów inwestycji fazy I MFW z zaznaczeniem projektów

1.3. Wytyczne dla inwestorów MFW do projektowania Systemu Ochrony Usługi Krytycznej GPS/GNSS (SOUKG) – główne założenia

Zespół, opracowując „Wytyczne dla inwestorów MFW do projektowania Systemu Ochrony Usługi Krytycznej GPS/GNSS (SOUKG)”, był świadomy realiów korporacyjnych oraz faktu, iż inwestorzy poszczególnych projektów MFW (Baltic II, Bałtyk II, Baltica 2, Baltica 3, Bałtyk III, Baltic Power, BC Wind) są odrębnymi często konkurencyjnymi podmiotami gospodarczymi (międzynarodowe konsorcja). To stanowi wyzwanie organizacyjne i techniczne w zakresie zapewnienia pełnej interoperacyjności budowanych podsystemów oraz harmonizacji danych tych podsystemów SOUKG. W rezultacie system musi funkcjonować na najwyższym poziomie technicznym i sprostać wymaganiom obronnym. Rozwiązanie tego wyzwania powinno zagwarantować, że powstała architektura będzie uniwersalnie skalowalna i może stanowić techniczną alternatywę dla obecnie wykorzystywanych rozwiązań budowy sieci stacji referencyjnych GNSS lub w pełni się z nimi integrować.

Zaproponowano rozwiązania hybrydowe przetwarzanie na brzegu sieci, we mgle i w chmurze obliczeniowej (scentralizowane centrum obliczeniowe w chmurze - infrastruktura obliczeniowa CI TASK). Rozwiązanie dostarcza płynnej, skalowalnej integracji i relatywnie prostego interfejsu przyłączenia kolejnych lokalizacji i turbin wiatrowych w jeden ekosystem SOUKG. Inwestorzy poszczególnych MFW, nawet działając niezależnie, mogą przyczynić się do budowy spójnego i rozszerzalnego systemu obejmującego stopniowo coraz większy obszar, nie tylko południowego Bałtyku, ale docelowo także terytorium całego kraju czy regionu.

Przewidziany w projekcie model przetwarzania danych na brzegu sieci, we mgle i w chmurze (Rys. 5) daje możliwość dalszego rozwoju w kierunku nowych technologii, takich jak sztuczna inteligencja (AI) czy algorytmy uczenia maszynowego, które jeszcze skuteczniej wspomogą detekcję zakłóceń i optymalizację procesów operacyjnych i decyzyjnych.

Wdrożenie i rozwój SOUKG:

- zwiększy bezpieczeństwo i niezawodność operacji morskich,
- zapewni wysoką precyzję nawigacji, niezbędną w środowisku MFW,

- wzmocni odporność kluczowej infrastruktury na zakłócenia i potencjalne zagrożenia,
- stworzy bazę do dalszej rozbudowy i integracji technologii na szerszym obszarze oraz w zakresie nowych rozwiązań (AI, Big Data).

Wytyczne spełniły swoją rolę ponad oczekiwania, gdyż poza ww. cechami zapewniającymi spójność wewnętrzną projektu opracowana architektura stwarza możliwość integracji z systemami:

- RTGMS Real-Time GNSS Monitoring System,
- SMZSG System Monitorowania Zakłóceń Sygnałów GNSS.

Zespoły projektowe ww. systemów współpracują i wykorzystują synergie do wzmocniania i polepszania funkcjonalności prowadzonych projektów. Nowoczesna architektura informatyczna i ortodoksja w przestrzeganiu kultury devops spowodowały, iż w chwili obecnej integracje międzysystemowe to kwestia decyzji menedżerskich, a nie problemów technicznych.

Osiągnięto dokładnie cel jaki stawia Ministerstwo Cyfryzacji w dokumencie strategicznym „Architektura Informacyjna Państwa”. Kluczem było bardzo szerokie spojrzenie na to jak zorganizowane są urzędy i rejestry państwowe, jakie są procedury administracyjne, jakie prawa i obowiązki zawarte są w systemie prawa, a także jak obywatele i przedsiębiorcy używają usług [AIP, 2025].

2. SYSTEM OCHRONY USŁUGI KRYTYCZNEJ GPS/GNSS (SOUKG)

System Ochrony Usługi Krytycznej GPS/GNSS (SOUKG) to zespół urządzeń pomiarowych - sensorów, systemów informatycznych, infrastruktury morskiej i lądowej oraz wyrafinowanej chmurowej techniki obliczeniowej zapewniających osiągnięcie na obszarze objętym monitoringiem SOUKG trzech funkcjonalności tj.:

- wysokiej precyzji, pewności i bezpieczeństwa prowadzenia nawigacji morskiej, lotniczej i lądowej oraz pewności dystrybucji czasu,
- detekcji i lokalizacji zakłóceń sygnałów nawigacji satelitarnej,
- systemu alarmowania/ostrzegania przed zagrożeniem wynikającym z zakłóceń i zagłuszeń GNSS.

System wykrywa i alarmuje o zagrożeniu Centra Operacyjne wojskowe i cywilne w czasie rzeczywistym.

Motywacją do rozwoju systemu była oczywiście sytuacja geopolityczna i wynikające z niej zagrożenia bezpieczeństwa występujące w szczególności na Morzu Bałtyckim oraz na wschodniej granicy UE/NATO. Zagrożenia, którym system ma przeciwdziałać to głównie zakłócenia i zagłuszenia w krytycznych usługach lokalizacyjnych i dystrybucji czasu. Wymienione zagrożenia mają negatywny wpływ na:

- sprawność i możliwości skutecznego wykorzystania nowoczesnych artyleryjskich i raketowych środków walki oraz innych intensywnie rozwijanych środków zarówno obrony jak i odpowiedzi,
- bezpieczeństwo ruchu lotniczego, morskiego i lądowego,
- bezpieczeństwo energetyczne, bezpieczeństwo łączności i ogólnie bezpieczeństwo gospodarcze, zachowanie ciągłości usługi GNSS znajduje się w istotnym interesie ekonomicznym RP i UE.

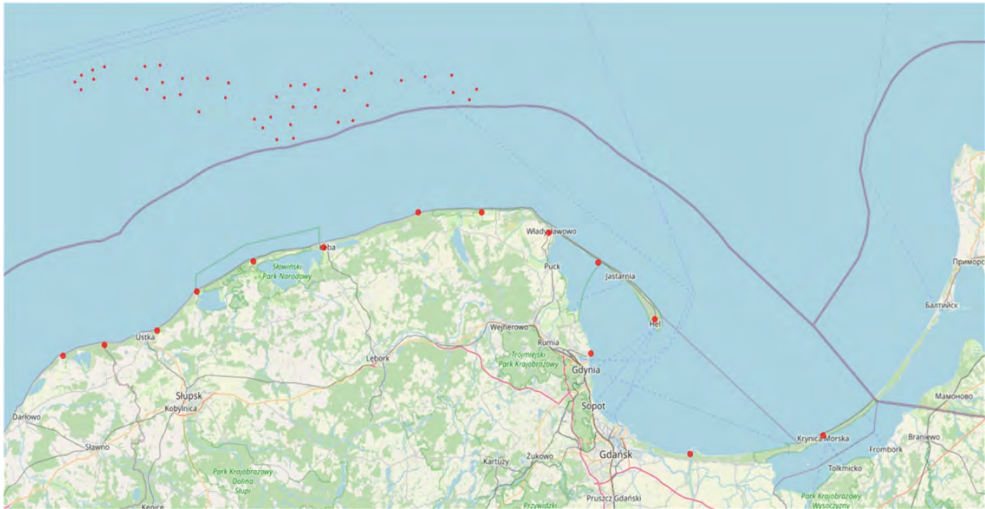
Dla podwyższenia skuteczności obronnej wykorzystano synergie występujące w obszarach wspólnego działania gospodarki, nauki oraz obronności. Transformacja energetyczna, modernizacja sił zbrojnych stworzyła dogodne warunki do synergicznego budowania bezpieczeństwa energetycznego i militarnego zwielfokrotniając oczekiwane efekty.

Koncepcja funkcjonalności SOUKG to wykorzystanie inwestycji Morskich Farm Wiatrowych do utrzymania i rozwoju systemów świadomości sytuacyjnej we wszystkich domenach i środowiskach walki oraz uzyskanie zdolności do natychmiastowego wykrywania i ostrzegania przed zakłóceniami GPS/GNSS. Zastosowane metody techniczne to analiza strumieni nieprzetworzonych danych, prowadzona na brzegu sieci, we mgle i w chmurze cyfrowej, a użyte metody obliczeniowe zaczerpnięto z fizyki statystycznej napędzają algorytmy sztucznej inteligencji.

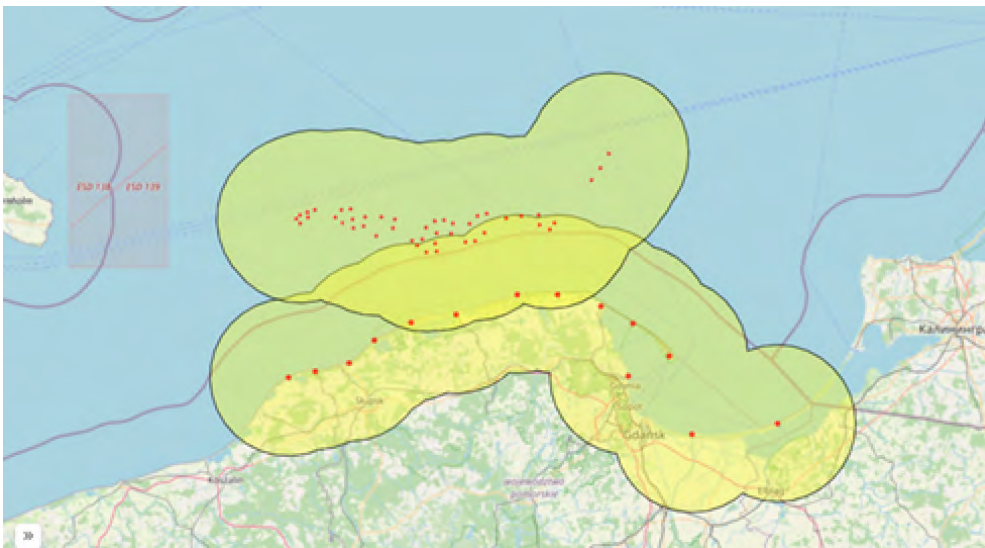
Funkcjonalności systemu na brzegu sieci realizowane są przez zespoły sensorów, do których zalicza się m.in.:

- odbiorniki GPS/GNSS wraz z antenami geodezyjnymi i antenami typu CRPA,
- analizatory programowe Software Defined Radio (SDR),
- akcelerometry Inertial Measurement Unit (IMU),
- odbiorniki ostrzeżeń lotniczych ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast),
- autorski sprzęt służący do uczenia algorytmów AI i fazowania atomowych źródeł czasu.

Konstelację sensorów SOUKG przedstawiono na rys. 2, natomiast na rys. 3 przedstawiono obszar, który zostanie objęty stałym monitoringiem.



Rys. 3a. Planowana konstelacja segmentu czajników/odbiorników SOUKG. Morskie stacje monitorujące i lądowe stacje referencyjne



Rys. 3b. Obszar monitoringu SOUKG

System Ochrony Usługi Krytycznej GPS/GNSS (SOUKG) stanowi kluczowy krok w kierunku zwiększenia bezpieczeństwa poprzez integrację zaawansowanych technologii GNSS, SDR, IMU oraz ADS-B. Wdrożenie i rozwój SOUKG umożliwia:

- podniesienie dokładności nawigacji dzięki precyzyjnym korektom RTK/RTN, co przekłada się na efektywniejsze prowadzenie operacji w rejonach morskich,

- wykrywanie i lokalizację zakłóceń sygnałów GNSS w czasie rzeczywistym, co umożliwi szybką reakcję w warunkach zagrożenia,
- kompleksową ochronę operacyjną, wzmacniającą bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej i realizacji zadań w wymagającym środowisku morskim.

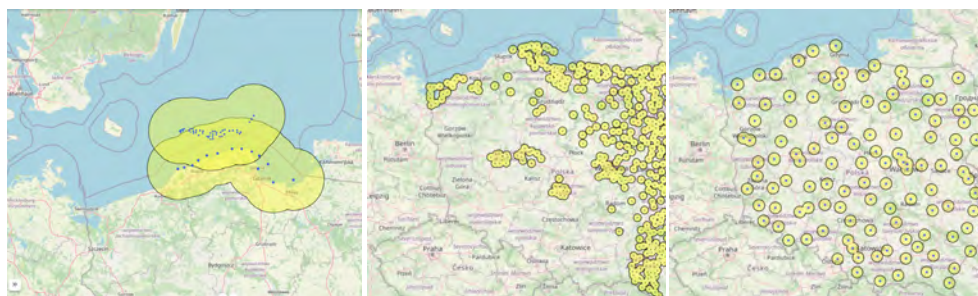
Wdrożenie i rozwój SOUKG:

- zwiększy bezpieczeństwo i niezawodność operacji morskich,
- zapewni wysoką precyzję nawigacji, niezbędną w dynamicznym środowisku MFW,
- wzmocni odporność kluczowej infrastruktury na zakłócenia i potencjalne zagrożenia,
- stworzy solidną bazę do dalszej rozbudowy i integracji technologii na szerszym obszarze oraz w zakresie nowych rozwiązań (Edge-Fog-Cloud Computing, AI, Big Data).

System Ochrony Usługi Krytycznej GPS/GNSS (SOUKG) został zaprojektowany, aby prowadzić realną walkę w domenie. Zasady i potrzeby wynikające ze sztuki wojennej narzuciły dobór technologii IT. Przewidziano w konstrukcji oparcie systemu na klastrze bojowe i poligonowe. Osiągnięto przestrzeń i zdolność do utrzymania stałej gotowości i prowadzenia walki (na klastrze bojowym) oraz do doskonalenia technik odpowiedzi (na klastrze poligonowym).

Przyjęte rozwiązanie IT to jakby inteligentny pancierz czołgu, który w wyścigu z pociskiem posiada wewnętrzną zdolność do modyfikacji i udoskonalania swojej odporności bez potrzeby remontu, wymiany i opuszczania pola walki. SOUKG z założenia jest „żywy” i reaktywny na zmienne środowiskowe. Dokładnie taki pogląd podzielili twórcy innych systemów np. RTGMS, który jest rozwijany w ramach projektu ESA przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii oraz Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy.

Co więcej zespoły projektowe zauważyły istnienie znaczących synergii, występujących pomiędzy SOUKG, a RTGMS polegających na zdolności do wzajemnego polepszania swoich funkcjonalności oraz zdolności do skalowania rozwiązań nawet na obszary znacznie wykraczające poza terytorium RP. Mocną stroną SOUKG jest unikalna technologia, rozwiązania IT zapewniające dynamiczną skalowalność wertykalną i horyzontalną, reaktywność i zdolność do ciągłego doskonalenia, a z kolei mocną stroną RTGMS jest sieć stacji referencyjnych rozlokowanych na obszarze całego kraju i jednostka mobilna detekcji zakłóceń. Projekty są komplementarne i wzajemnie się uzupełniają i wzmacniają. Integracja obu rozwiązań SOUKG i RTGMS oraz przyłączenie stacji i sensorów spoza obszaru RP stwarza perspektywę, objęcia monitoringiem obszar wykraczający poza terytorium RP (Rys 4).

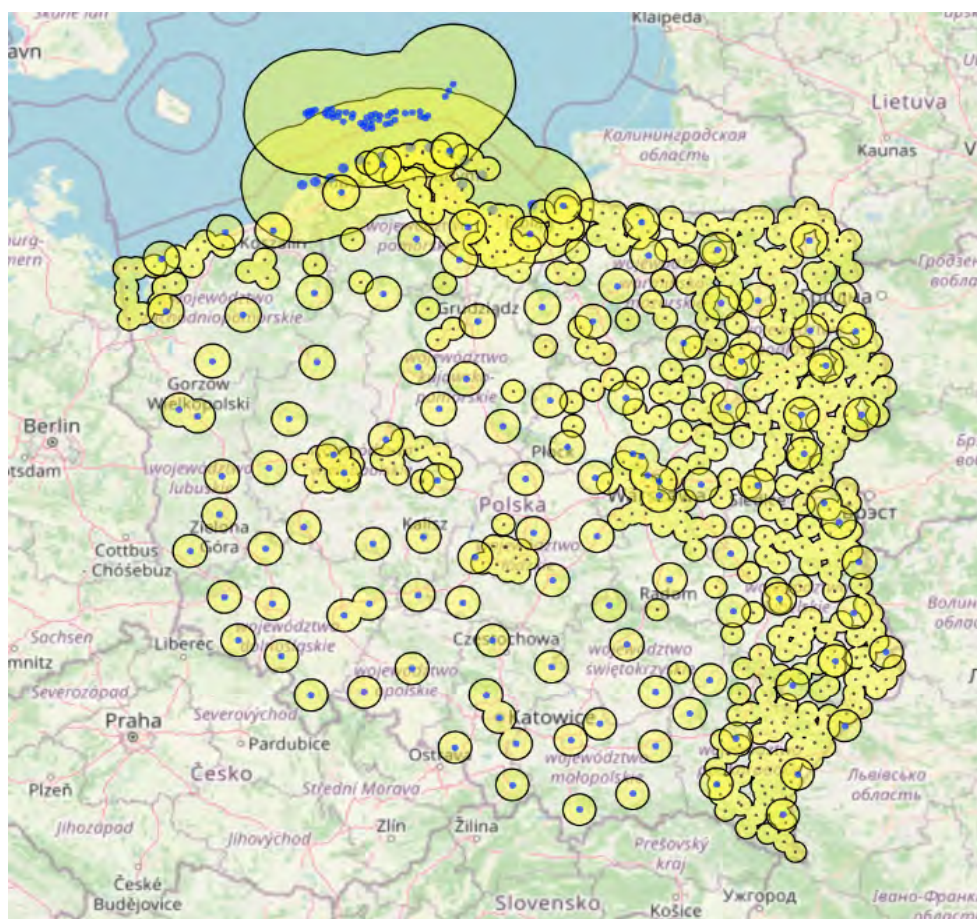


SOUKG – MON

SZMSG – POLSA

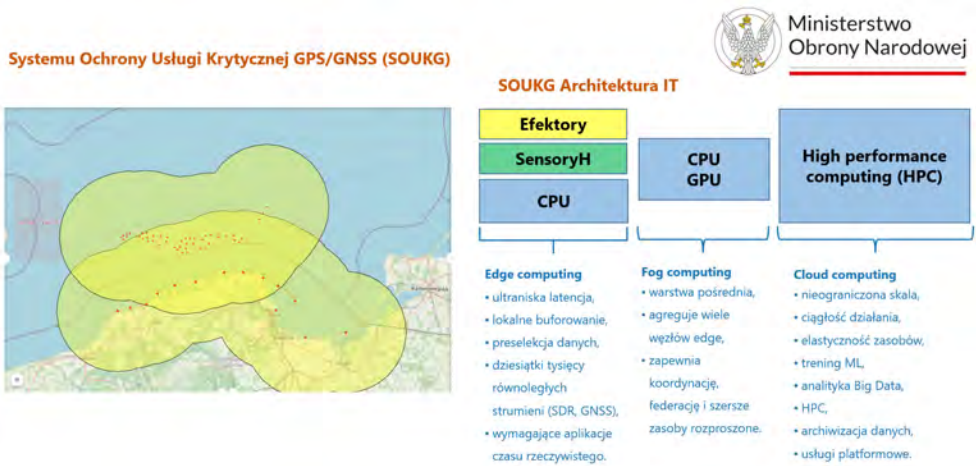
RTGMS2 – MC/MRiT

Rys. 4a. Specyfika systemów SOUKG, SZMSG oraz RTGMS

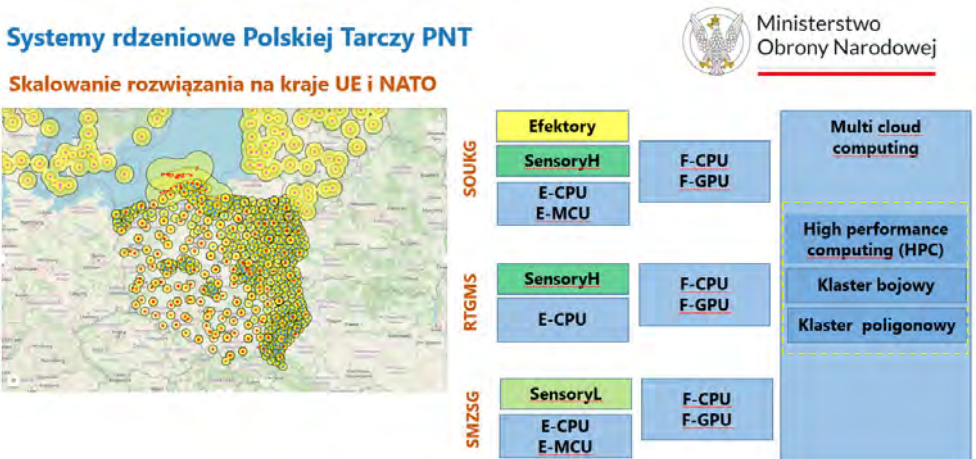


Rys. 4b. Synergia systemów SOUKG, SZMSG oraz RTGMS na terytorium RP

Resorty oraz instytuty badawcze analizują obecnie dalszą integrację międzysystemową SOUKG, RTGMS z Systemem Monitorowania Zakłóceń Sygnałów GNSS (SMZSG), który realizowany jest przez Polska Agencję Kosmiczną i wnosi potencjał IoT z prawdopodobną możliwością stosowania AI-IoT i jeszcze większego zagęszczenia gridu sensorów przy obniżeniu kosztów budowy i eksploatacji.



Rys. 5a. Hiperskalowalna architektura SOUKG MON jako rdzeń European shield for PNT



Rys. 5b. Architektura integracji oparta o SOUKG MON jako rdzeń PL/European shield for PNT



Rys. 6. Polska Tarcza PNT i jej rdzeniowy system SOUKG w Krajowym Systemie Cyberbezpieczeństwa

3. PERSPEKTYWY

Ustawa o zarządzaniu kryzysowym [uozk,2007] podaje definicję infrastruktury krytycznej, wymieniając jej charakterystyki i na pierwszym miejscu znajduje się energia. Taki pogląd nie napotyka szczególnej dyskusji i wyróżnione miejsce i znaczenie energii jest oczywiste, o ile pewnym fluktuacjom podlega sama idea infrastruktury, która obecnie podąża w kierunku definiowania usług krytycznych jako pojęcia bardziej pierwotnego od obiektów fizycznych to nie zauważa się zmiany w zakresie postrzegania znaczenia energii jako fundamentalnego składnika absolutnie niezbędnego do jakiegokolwiek działania.

Siły Zbrojne funkcjonują w realiach transformacji energetycznej, a codziennością jest zapewnienie, aby inwestycje energetyczne mogły się rozwijać w sposób, który nie naruszy potencjału obronnego, a optymalnie, gdyby jeszcze wzmocniła zdolności obronne.

Świadomość, iż Morska Energetyka Wiatrowa stworzyła możliwości do wzmocnienia systemów obronności świadomości, które dostrzeżono po zmianie perspektywy i zmianie percepcji oraz kategoryzacji mentalnej transformacji energetycznej z grupy potencjalnych problemów do grupy potencjalnych szans, skłania do kolejnych refleksji, które można sformułować w formie następujących pytań:

- Czy podobna synergia jak w przypadku Morskich Farm Wiatrowych jest możliwa w przypadku lądowej energetyki odnawialnej?

- Czy rozproszenie lądowej energetyki odnawialnej na większym obszarze i wysoki współczynnik odporności na oddziaływania natury sabotażowej oraz punktowe oddziaływania kinetyczne jest istotny operacyjnie?
- Jak skutecznie zabezpieczać energetycznie pododdziały, oddziały i związki taktyczne w MSD w rejonach ześrodkowania oraz w rozwinięciu? Jak to robić optymalnie i jakie dobierać nośniki energii?
- Jak powinna funkcjonować infrastruktura i ogólnopojęta energetyka wojskowa na przyszłym polu walki?
- Jak zapewnić maksymalną odporność energetyczną siłom zbrojnym tak aby osiągnąć swobodę operacyjną we wszystkich domenach walki?
- Jak infrastrukturalnie w rejonie odpowiedzialności zapewnić PNT dla procesów dystrybucji i przetwarzania energii?

Z tymi problemami mierzą się SZRP, cząstkowe odpowiedzi są znane, ale sformułowanie spójnej strategii wymaga głębokiego namysłu, odpowiedzialności i współdziałania triady nauka-obronność-gospodarka.

Odpowiedzi na powyższe pytania nie będą oczywiste podobnie jak nieoczywisty jest związek pomiędzy rosyjskim zautomatyzowanym systemem RB-301B Borisoglebsk-2, a infrastrukturą wojskową i Morskimi Farmami Wiatrowymi, ale taki związek istnieje, a jego znalezienie pozwoliło na uzyskanie korzyści obronnych i przekucie problemu w korzyść obronną.

Koniecznością wojskową jest postrzeżenie wielodomenowe i adaptacja klasycznych metod wsparcia i zabezpieczenia wojsk do połączonej przestrzeni wszystkich domen. Ten proces już trwa, SZRP tego doświadczają i pozostają reaktywne dostosowując się do wymagań.

Przekształceniu ulegnie także przestrzeń działania logistyki wojskowej i logistyki cywilnej, prawdopodobnie kluczowym obiektem działania staną się nośniki energii i wszelkie operacje na tych nośnikach.

Aby utrzymać sprawność logistyki wojskowej i cywilnej, niezbędny jest nieprzerwany dostęp do niezawodnych, zduplikowanych systemów PNT – pozycji, nawigacji i synchronizacji czasu. W perspektywie odporności energetycznej sił zbrojnych potrzeba ta staje się jeszcze bardziej znacząca, ponieważ stabilne wzorce częstotliwości i czasu stanowią fundament procesów przesyłu oraz przetwarzania energii. To właśnie te procesy, jak wszystko wskazuje, będą w nadchodzących latach absolutnie krytyczne zarówno dla operacji militarnych, jak i funkcjonowania całej sfery cywilizacyjnej.

4. WNIOSKI

Budowa Morskich Farm Wiatrowych to istotny element w zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego Polski, dlatego też kluczowym było zastosowanie odpowiednich technicznych środków kompensujących przez inwestorów MFW. Takie

rozwiązanie, z jednej strony zapewnia utrzymanie zdolności SZ RP jako kluczowego elementu systemu bezpieczeństwa państwa, a z drugiej daje możliwość rozwoju potencjału energetycznego naszego kraju. Drugim równie istotnym elementem jest stabilność sygnału GNSS, którego zakłócenia stają się dziś problemem systemowym, który kształtuje strategię wojskowe państw NATO oraz wpływa na modele biznesowe, operatorów energii i przewoźników. Wzrost skoordynowanych ataków jammingu i spoofingu na wschodniej flance Sojuszu unaoczniał, że utrata sygnału satelitarnego może w ciągu minut sparaliżować operacje lotnicze i logistykę o krytycznym znaczeniu gospodarczym. Poniższe wnioski rozwijają tę problematykę i sygnalizują jakie działania powinni podjąć regulatorzy, operatorzy lotniczy, wojsko i przemysł, aby zbudować odporny, wieloźródłowy ekosystem PNT (Position, Navigation and Timing – Pozycjonowanie, Nawigacja i Synchronizacja Czasu):

- zakłócenia GNSS to zagrożenie systemowe, a nie czysto techniczne. Rosnąca liczba incydentów jammingu i spoofingu – od Trident Juncture 2018 po serię zakłóceń w Polsce i na Litwie (2023-24) – wskazuje, że utrata sygnału satelitarnego może spowodować paraliż lotnictwa, logistyki i energetyki.
- transformacja energetyczna może wzmacniać obronność, jeśli zaplanuje się ją z we współdziałaniu z wojskiem i w bardzo holistycznym podejściu. Wymóg kompensacji strat militarnych przy budowie Morskich Farm Wiatrowych stworzył unikalną szansę – zamiast osłabiać obronność, farmy wspierają dziś świadomość sytuacyjną.
- System Ochrony Usługi Krytycznej GNSS (SOUKG) udowadnia, że rozproszone, chmurowe podejście dostarcza optymalnego rozwiązania,
- model działania wypracowany w Departamencie Infrastruktury może stać się wzorcem współpracy triady nauka-obronność-przemysł,
- nie liczne, ale wysokowykwalifikowane i dynamiczne zespoły kompetentnych żołnierzy i naukowców są w stanie wypracowywać i wdrażać zaawansowane technologie promując przy tym polski potencjał akademicki, wojskowy i gospodarczy,
- edukacja w zakresie ochrony infrastruktury i usług krytycznych powinna stać się kanonem i absolutnym wymogiem dla kadry technicznej i menadżerskiej wszystkich szczebli.

Przyszłością bezpieczeństwa krytycznych systemów nawigacji i dystrybucji czasu jest wielowarstwowa, rozproszona architektura łącząca branżę energetyczną, naukę i wojsko, a ochrona GNSS powinna być wpisana w każdą dużą inwestycję infrastrukturalną jako warunek sine qua non. Zespół Zadaniowy udowodnił, że dzięki wizji integrującej sektory oraz dialogu zainteresowanych stron (wojsko, przemysł) opartym na wzajemnym zrozumieniu można jednocześnie chronić interesy bezpieczeństwa narodowego i przyspieszać modernizację gospodarczą. Zespół Zadaniowy stał się osią całego przedsięwzięcia: od koncepcji, przez realizację, aż po skalowanie i standaryzację rozwiązania dla partnerów zagranicznych. Doświadczenia

zebrane w pierwszym etapie inwestycji w morskie farmy wiatrowe posłużą do ewolucji przepisów prawa regulujących tę problematykę.

Sformułowane wnioski pokrywają się z NIS 2, która tworzy „nowy, twardszy standard cyberhigieny” w UE. Rozszerza liczbę podmiotów objętych regulacją, nakłada szczegółowe obowiązki techniczne i zarządcze, wprowadza surowe kary oraz osobistą odpowiedzialność kierownictwa. Dla infrastruktury krytycznej – zwłaszcza energetyki, transportu i usług GNSS – oznacza konieczność budowy wielowarstwowej, odpornej architektury bezpieczeństwa oraz stałego nadzoru nad łańcuchem dostaw. NIS 2 premiuje redundancję usług (np. wieloźródłowe PNT), co wymusza utrzymanie i budowę alternatywnych technologii (ILS/DME, eLORAN itp., „GPS lądowy”) ponadto projekty takie jak SOUKG i RTGMS wpisują się w wymóg ciągłego monitoringu zagrożeń i szybkiego raportowania incydentów zakłóceń GNSS. NIS 2 przesuwa ochronę PNT z poziomu „dobrych praktyk” na obowiązek prawny.

Model zarządzania wysokowykwalifikowanymi zespołami przyjęty przez Zespół Zadaniowy kierowany przez P-5 SG WP z wypracowaniem kompromisu podsystemu bezpieczeństwa obronnego oraz bezpieczeństwa energetycznego państwa i trwającej transformacji energetycznej okazał się efektywny znacząco ponad oczekiwania. Warto podkreślić, że wysoko wykwalifikowane, rozproszone i dynamiczne grupy robocze funkcjonujące w ramach Zespołu zapewniły istną kaskadę innowacji i rozwiązań gotowych do użycia przy minimalizacji ponoszonych kosztów.

Wykaz użytych skrótów

Skrót	ang./oryg.	pol.
A2/AD	Anti-Access / Area Denial	Odmowa dostępu/blokada obszaru
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast	Pokładowy system dozoru „nada-waj-i-odbieraj”
ASG-EUPOS		Aktywna Sieć Geodezyjna EUPOS
BeiDou		Chiński system GNSS
CRPA	Controlled Reception Pattern Antenna	Kierunkowa antena formująca wiązkę odbiorczą
DME	Distance Measuring Equipment	Radiodalmierz pokładowy
EASA	European Union Aviation Safety Agency	Europejska Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego
ESA	European Space Agency	Europejska Agencja Kosmiczna

Wykaz użytych skrótów (ciąg dalszy)

Skrót	ang./oryg.	pol.
EUSPA	European Union Agency for the Space Programme	Agencja Unii Europejskiej ds. Programu Kosmicznego
Galileo		Europejski system GNSS
GBAS	Ground-Based Augmentation System	Naziemny system wspomagania GNSS
GLONASS		Rosyjski system GNSS
GNSS	Global Navigation Satellite Systems	Globalne systemy nawigacji satelitarnej
GPS	Global Positioning System	Amerykański system GNSS
GUGiK		Główny Urząd Geodezji i Kartografii
HPC	High-Performance Computing	Obliczenia wysokiej wydajności
ILS	Instrument Landing System	System lądowania według przyrządów
IŁ-PIB		Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy
IMU	Inertial Measurement Unit	Zespół czujników inercyjnych
IoT	Internet of Things	Internet rzeczy
MFW		Morskie Farmy Wiatrowe
NIS 2		Dyrektywa (UE) 2022/2555
PNT	Position, Navigation & Timing	Pozycjonowanie, nawigacja i synchronizacja czasu
RNP	Required Navigation Performance	Wymagana dokładność nawigacyjna
RTGMS	Real-Time GNSS Monitoring System	Krajowy system ciągłego monitoringu GNSS
RTK	Real-Time Kinematic	pozycjonowanie w czasie rzeczywistym
RTN	RTN	Sieciowa odmiana RTK (korekty z wielu stacji)
SDR	Software-Defined Radio	Radio definiowane programowo
SMZSG	GNSS Interference Monitoring System	System Monitorowania Zakłóceń Sygnałów GNSS

Wykaz użytych skrótów (ciąg dalszy)

Skrót	ang./oryg.	pol.
SOUKG		System Ochrony Usługi Krytycznej GNSS
ULC		Urząd Lotnictwa Cywilnego
ZPiPRSZ-P5		Zarząd Planowania i Programowania Rozwoju Sił Zbrojnych-P5

LITERATURA

- [AIP, 2025] Architektura Informacyjna Państwa – Ministerstwo Cyfryzacji, 2025. Architektura Informacyjna Państwa. Dostępne na: Architektura Informacyjna Państwa - Ministerstwo Cyfryzacji - Portal Gov.pl [dostęp: 03 listopada 2025].
- Bartosiak J., 2008. Rzeczpospolita między lądem a morzem. O wojnie i pokoju. Warszawa: Zona Zero.
- [decMON, 2024] decyzja nr 228/ZPiPRSZ-P5 Ministra Obrony Narodowej z dnia 13 czerwca 2024 r. w sprawie utworzenia Zespołu Zadaniowego do uzgodnień dotyczących stosowania technicznych środków kompensujących przez Inwestorów Morskich Farm Wiatrowych
- C4ADS, 2019. Above Us Only Stars: Exposing GPS Spoofing in Russia and Syria. Dostępne na: Above Us Only Stars - C4ADS [dostęp: 03 listopada 2025].
- [EUSPA,2024] European Union Agency for the Space Programme (EUSPA), 2024. EO and GNSS Market Report 2024. Dostępne na: GNSS and EO Market Report | EU Agency for the Space Programme [dostęp: 03 listopada 2025].
- [NIS 2, 2022] Parlament Europejski i Rada UE, 2022. Dyrektywa (UE) 2022/2555 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 grudnia 2022 r. w sprawie środków zapewniających wysoki wspólny poziom cyberbezpieczeństwa w całej Unii (NIS 2), zmieniająca rozporządzenie (UE) nr 910/2014 i dyrektywę (UE) 2018/1972 oraz uchylająca dyrektywę (UE) 2016/1148. Dziennik Urzędowy UE L 333, 27 grudnia 2022, s. 65–116. Dostępne na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:32022L2555> [dostęp: 03 listopada 2025]
- [Uozk,2007] Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2007. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (t.j. Dz.U. 2023 poz. 122).
- [Uobm,2011] Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, 2011. Ustawa z dnia 18 sierpnia 2011 r. o bezpieczeństwie morskim (Dz.U. 2011 Nr 228 poz. 1368; t.j. Dz.U. 2024 poz. 1068, 1933).
- [Wytyczne, 2025] Żurawski W., Figurski M., Proficz J., Szolucha M., Nykiel G., Pazderski E. i Cholewa T., 2025. Wytyczne dla inwestorów MFW do projektowania Systemu Ochrony Usługi Krytycznej GPS/GNSS (SOUKG). Warszawa: Departament Infrastruktury MON, IMGW-PIB, Politechnika Gdańska, Wojskowa Akademia Techniczna, UMK

w Toruniu & Ekspert DevSecOpS (raport opracowany w lutym 2025). MON 28.03.2025 r.

10. [MC, 2025] MC/IŁ-PIB Notatka ze spotkania dotyczącego: Aktywności UE z zakresu synchronizacji czasu oraz wykorzystania Programu Polskiej Tarczy PNT jako systemowej odpowiedzi na działania hybrydowe i atak w cyberprzestrzeni na systemy GPS/GNSS. 22.09.2025 r.

REACTIVE ACTIONS OF THE POLISH ARMED FORCES IN THE PROCESS OF ENERGY INVESTMENTS RELATED TO THE CONSTRUCTION OF OFFSHORE WIND FARMS.

POLISH STATE'S SYSTEMIC RESPONSE TO THE HYBRID ATTACK ON SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS

Abstract

Energy transition and the investments underway in the Baltic Sea—such as the construction of Offshore Wind Farms (OWF)—have fostered close cooperation between the scientific community, industry, and the defence sector. This article explains how research initially carried out for space-mission needs, together with tasks executed by the Armed Forces Development Planning and Programming Board (P-5) and the Infrastructure Department of the Polish Ministry of National Defence, was transformed into the concept of a GNSS Critical Service Protection System (SOUKG): a distributed network of land- and sea-based sensors designed to detect satellite-signal interference.

The authors outline the decision-making process and its results, demonstrating how military requirements were incorporated into the OWF investment timeline—projects that are pivotal to the broader energy transition. They describe SOUKG's architecture and the way the system is being integrated with the existing RTGMS network and complementary initiatives conducted under ESA and NATO, thereby creating a scalable, fully integrated environment. The operating model—combining academic resources, the offshore industry, and government institutions—may serve as a template for other NATO countries preparing for increasingly sophisticated threats. The approach adopted by the P-5 Board has already triggered a cascade of innovations, including the vision of a “terrestrial GNSS”: a navigation-and-timing system designed to be completely immune to GNSS interference, in addition to SOUKG itself.

Energy transition and the investments underway in the Baltic Sea—such as the construction of Off-shore Wind Farms (OWF)—have fostered close cooperation between the scientific community, industry, and the defence sector. This article explains how research initially carried out for space-mission needs, together with tasks executed by the Armed Forces Development Planning and Programming Board (P-5) and the Infrastructure Department of the Polish Ministry of National Defence, was transformed into the concept of a GNSS Critical Service Protection System (SOUKG): a distributed network of land- and sea-based sensors designed to detect satellite-signal interference.

The authors outline the decision-making process and its results, demonstrating how military requirements were incorporated into the OWF investment timeline—projects that are pivotal to the broader energy transition. They describe SOUKG’s architecture and the way the system is being integrated with the existing RTGMS network and complementary initiatives conducted under ESA and NATO, thereby creating a scalable, fully integrated environment. The operating model—combining academic resources, the offshore industry, and government institutions—may serve as a template for other NATO countries preparing for increasingly sophisticated threats. The approach adopted by the P-5 Board has already triggered a cascade of innovations, including the vision of a “terrestrial GNSS”: a navigation-and-timing system designed to be completely immune to GNSS interference, in addition to SOUKG itself.

The rapid expansion of offshore wind farms (OWFs) in the Polish Exclusive Economic Zone has triggered a unique civil-military-academic collaboration led by the Infrastructure Directorate of the Ministry of National Defence (DI MoND). Confronted with rising GNSS jamming and spoofing on NATO’s eastern flank, DI MoND issued technical guidelines obliging OWF investors to deploy the Critical GNSS Service Protection System (SOUKG) – a distributed edge-fog-cloud sensor network providing real-time detection, geolocation and reporting of satellite-signal interference.

This paper traces the decision-making process that integrated military requirements into Poland’s energy-transition timeline; outlines SOUKG’s architecture and its interoperability with the national Real-Time GNSS Monitoring System (RTGMS) and ESA/NATO projects; and analyses compliance with the NIS 2 Directive, which classifies space-based PNT services as “essential entities”. The Polish model demonstrates how energy infrastructure can enhance rather than degrade defence posture, offering a scalable blueprint for Allied nations facing sophisticated electromagnetic threats.

Keywords: art of war, hybrid operation, GNSS security, gnss interference, cybersecurity

Sławomir SZRAMA*
Szymon LEWICKI**

ODPORNOŚĆ INFRASTRUKTURY NAWIGACJI SATELITARNEJ NA ZAKŁÓCENIA GNSS W KONTEKŚCIE BEZPIECZEŃSTWA PAŃSTWA I CIĄGŁOŚCI DZIAŁANIA SYSTEMÓW KRYTYCZNYCH

Tematem artykułu jest analiza wpływu celowego zakłócania (jamming) i fałszowania (spoofing) sygnałów Globalnych Systemów Nawigacji Satelitarnej (GNSS) na bezpieczeństwo lotnictwa cywilnego. Przedstawiono uwarunkowania podatności sygnałów nawigacyjnych na interferencje oraz zidentyfikowano źródła emisji systemów walki radioelektronicznej w Europie Środkowo-Wschodniej. Przeprowadzono analizę danych o incydentach z lat 2021-2025 zgromadzonych w systemach ECCAIRS, ze szczególnym uwzględnieniem Rejonu Informacji Powietrznej Warszawa, oraz omówiono przypadek zakłóceń w porcie lotniczym w Tartu. Wyniki wskazują na systemowy charakter zagrożeń. Zaproponowano techniczne i operacyjne metody minimalizacji ryzyka, w tym koncepcję Minimalnej Sieci Operacyjnej (MON).

Słowa kluczowe: Globalny System Nawigacji Satelitarnej GNSS, spoofing, jamming, bezpieczeństwo lotnictwa

1. WPROWADZENIE

Współczesna inżynieria lotnicza oraz systemy zarządzania ruchem lotniczym przeszły w ostatnich latach fundamentalną transformację. Odeszły one od klasycznego modelu nawigacji opartego na naziemnych pomocach radionawigacyjnych w stronę nawigacji opartej na charakterystykach (PBN – Performance Based Navigation) [ICAO 2013]. Fundamentem tej zmiany stała się globalna dostępność i wysoka precyzja Glo-

* Politechnika Poznańska, Instytut Napędów i Lotnictwa.

** Politechnika Poznańska, student Lotnictwa .

balnych Systemów Nawigacji Satelitarnej (GNSS), które stały się „krwiobiegami” nowoczesnej awioniki [ICAO 2017]. Przestrzeń PNT (pozycja, nawigacja, czas) synchronizuje dziś nie tylko trajektorię lotu, ale również krytyczne systemy łączności, dozoru oraz ostrzegania przed kolizjami.

Architektura systemu GNSS była projektowana z założeniem funkcjonowania w relatywnie czystym środowisku elektromagnetycznym. Sygnał satelitarny docierający do anteny odbiornika charakteryzuje się bardzo niską mocą, co czyni systemy nawigacji satelitarnej naturalnie podatnymi na interferencje radiowe [Corrigan et al. 1999]. Sytuacja ta uległa drastycznej zmianie w wyniku eskalacji napięć geopolitycznych w Europie Środkowo-Wschodniej. Obserwowane tam zjawiska wykraczają znacznie poza proste zagłuszanie sygnału (jamming), prowadzące do utraty funkcji nawigacyjnych. Znacznie groźniejszym zjawiskiem stało się celowe fałszowanie sygnału (spoofing), które prowadzi do błędów pozycji rzędu dziesiątek kilometrów i degradacji systemów separacji ruchu lotniczego [Tippenhauer et al. 2011].

Celem niniejszego artykułu jest analiza skali oddziaływania celowego zakłócenia i fałszowania sygnałów GNSS na bezpieczeństwo żeglugi powietrznej w latach 2021-2025, ze szczególnym uwzględnieniem Rejonu Informacji Powietrznej (FIR) Warszawa oraz basenu Morza Bałtyckiego, a także wskazanie technicznych i operacyjnych metod minimalizacji tego ryzyka.

2. MECHANIZMY I ŹRÓDŁA ZAKŁÓCEŃ GNSS

2.1. Podatność sygnału i techniki ataku

Kluczowym argumentem wyjaśniającym łatwość, z jaką systemy walki radioelektronicznej (WRE) są w stanie zneutralizować sygnał GNSS, jest analiza bilansu energetycznego na linii satelita-samolot. Nadajniki satelitów (np. w systemie GPS) emitują sygnał o relatywnie niskiej mocy (ok. 27 W dla sygnału cywilnego). Sygnał ten musi pokonać dystans ponad 20 tysięcy kilometrów, co wiąże się z ogromnym tłumieniem w wolnej przestrzeni. W efekcie, moc użytecznego sygnału nawigacyjnego docierającego do statku powietrznego wynosi zaledwie około -160 dBW, co plasuje go o kilkanaście decybeli poniżej naturalnego poziomu szumu termicznego otoczenia [Magiera i Katulski 2014].

Ta immanentna cecha fizyczna sprawia, że środowisko nawigacyjne jest ekstremalnie podatne na celowe manipulacje, które dzielą się na dwie główne kategorie:

- zagłuszanie (ang. jamming) – polega na emisji sygnałów radiowych o dużej mocy w pasmach GNSS, najczęściej z wykorzystaniem technik takich jak fala ciągła, szum szerokopasmowy lub sygnały przemiatane częstotliwościowo. Prowadzi to do desensytyzacji odbiornika pokładowego i w efekcie do utraty zdolności wyznaczania pozycji [C4ADS 2019],

- fałszowanie (ang. spoofing) – jest formą ataku znacznie bardziej zaawansowaną. Polega na generowaniu i nadawaniu fałszywych, ale koherentnych sygnałów nawigacyjnych. Odbiornik synchronizuje się z silniejszym sygnałem agresora i na jego podstawie oblicza całkowicie błędną pozycję lub czas [OPSGROUP 2024]. Atak ten często nie generuje standardowych ostrzeżeń w kokpicie, co stanowi bezpośrednie zagrożenie dla systemów ostrzegania przed kolizją z ziemią.

2.2. Geopolityczne i technologiczne źródła emisji

Współczesna rosyjska doktryna traktuje walkę radioelektroniczną jako kluczowy element strategii tzw. „bańki antydostępowej” (A2/AD) [Smura 2016]. Obserwowane w rejonie Morza Bałtyckiego i nad Polską masowe zakłócenia stanowią technologiczną manifestację tych założeń. Obwód Królewiecki pełni funkcję wysuniętego bastionu, nasyconego infrastrukturą emitującą energię elektromagnetyczną o dużej mocy. Dostępne dane i analizy widmowe wskazują, że źródłem tych anomalii są najprawdopodobniej zaawansowane systemy stacjonarne (np. 14Ts227 „Tobol”), zaprojektowane pierwotnie do działań w domenie kosmicznej [3GIMBALS 2023]. Ze względu na dużą moc nadajników i daleki horyzont radiowy dla samolotów na wysokościach przelotowych, systemy te "oświetlają" wiązką zakłócającą przestrzeń powietrzną nad znaczną częścią Europy Środkowo-Wschodniej [Aireon 2024]. Lotnictwo cywilne staje się w ten sposób ofiarą uboczną uruchomienia infrastruktury, której pierwotnym celem jest maskowanie ruchów wojsk i ochrona przed amunicją precyzyjną.

3. ANALIZA INCYDENTÓW W POLSKIEJ I EUROPEJSKIEJ PRZESTRZENI POWIETRZNEJ

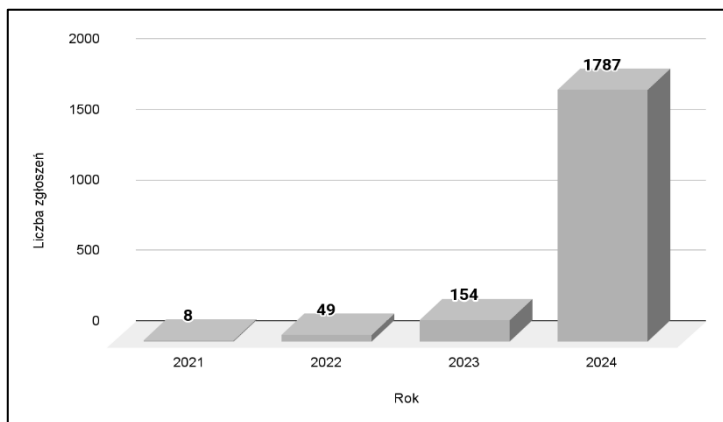
3.1. Skala zjawiska na podstawie danych z systemów bezpieczeństwa

Aby zweryfikować teoretyczne zagrożenia, przeprowadzono szczegółową analizę danych statystycznych z lat 2021–2024, zgromadzonych w europejskim systemie zgłaszania zdarzeń lotniczych ECCAIRS. Jak zilustrowano na rysunku 1 (Rys. 1), ogólnoeuropejska analiza wskazuje na drastyczny trend wzrostowy.

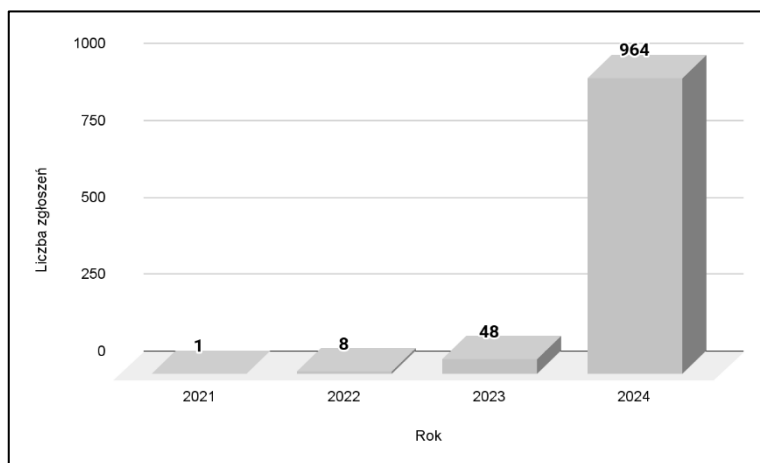
W 2021 roku odnotowano zaledwie 8 zgłoszeń, co mogło sugerować marginalny charakter zjawiska lub ograniczoną świadomość personelu. W latach 2022 i 2023 liczba ta wzrosła odpowiednio do 49 i 154 przypadków, sygnalizując postępujące nasilenie problemu. Najbardziej krytyczna zmiana nastąpiła jednak w 2024 roku, kiedy liczba raportowanych incydentów osiągnęła bezprecedensowy poziom 1787 zgłoszeń, stanowiąc ponad jedenastokrotny wzrost w stosunku do roku poprzedniego.

Na tym tle szczególnie alarmująco prezentują się statystyki zawężone wyłącznie do polskiej przestrzeni powietrznej, co zostało szczegółowo przedstawione na rysunku 2 (Rys. 2). W Rejonie Informacji Powietrznej (FIR) Warszawa w 2021 roku zarejestrowano zaledwie 1 tego typu przypadek. W kolejnych latach obserwowano systematyczny, proporcjonalny wzrost (8 zgłoszeń w 2022 r. i 48 w 2023 r.), lecz w 2024 roku nastąpił gwałtowny, niemal tysiąckrotny skok w stosunku do roku bazowego, osiągając pułap 964 zarejestrowanych incydentów.

Porównując te zbiory danych, można łatwo zauważyć, że w 2024 roku zgłoszenia pochodzące z FIR Warszawa stanowiły ponad połowę wszystkich incydentów raportowanych w całej Europie. Tak ogromna koncentracja problemu w polskiej przestrzeni powietrznej wynika z jej strategicznego położenia geograficznego i bezpośredniego sąsiedztwa źródeł emisji zlokalizowanych w Obwodzie Królewieckim. Powyższe statystyki jednoznacznie dowodzą, że celowe zakłócanie systemów GNSS przestało być anomalią, a stało się powszechnym, systemowym zjawiskiem, bezpośrednio uderzającym w bezpieczeństwo i ciągłość operacji lotniczych.



Rys. 1. Liczba zgłoszeń do systemu ECCAIRS (cała Europa) związanych z zakłócaniem systemów GNSS w latach 2021-2024



Rys. 2. Liczba zgłoszeń do systemu ECCAIRS wyłącznie z obszaru FIR WARSZAWA związanych z zakłócaniem systemów GNSS w latach 2021-2024

3.2. Weryfikacja zagrożenia na podstawie danych telemetrycznych i raportów międzynarodowych

Dla uzyskania pełnego obrazu sytuacji, dane z systemu ECCAIRS należy zestawiać obiektywnymi danymi telemetrycznymi oraz raportami międzynarodowych agencji bezpieczeństwa. Jak wynika z oficjalnego raportu przedłożonego Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego (ICAO) przez grupę państw nordyckich i bałtyckich (m.in. Szwecję, Finlandię, Litwę, Łotwę, Estonię i Polskę), tylko w okresie czterech miesięcy (od stycznia do kwietnia 2025 roku) w regionie tym zarejestrowano aż 123 000 przypadków degradacji sygnału GNSS na pokładach cywilnych statków powietrznych [SVT 2025]. Z tej liczby 46 000 zdarzeń miało miejsce nad wodami międzynarodowymi Morza Bałtyckiego, a pozostałe 77 000 w przestrzeni powietrznej państw zgłaszających. Średnia dobowa liczba incydentów w badanym obszarze przekraczała 1000 zdarzeń, co ostatecznie dowodzi, że utrata integralności sygnału przestała mieć charakter losowy [SVT 2025].

Niezależne analizy prowadzone przez Agencję Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA) potwierdzają krytyczne położenie Polski na mapie zagrożeń elektromagnetycznych [EASA 2022]. W zestawieniach globalnych polska przestrzeń powietrzna (FIR Warszawa) zajmuje regularnie czwarte miejsce na świecie pod względem ryzyka wystąpienia zakłóceń. Ustępuje ona jedynie rejonom o specyficznej charakterystyce geopolitycznej lub aktywnym strefom konfliktów, takim jak FIR Ankara, FIR Helsinki oraz FIR Bagdad. Należy przy tym podkreślić, że w przeciwieństwie do stref działań zbrojnych, Polska stanowi kluczowy węzeł komunikacyjny dla tranzytu cywilnego w relacji Wschód-Zachód, co potęguje wagę problemu.

Równie niepokojące trendy jakościowe płyną z raportów technicznych grupy roboczej OPSGROUP [OPSGROUP 2024]. Analitycy wskazują na wyraźną ewolucję wektora ataku: o ile w latach 2022–2023 dominowało klasyczne zagłuszanie (skutkujące po prostu utratą sygnału), o tyle w 2024 roku nastąpił drastyczny wzrost przypadków fałszowania danych (spoofingu) [OPSGROUP 2024]. W tym wariancie odbiorniki GNSS zachowują poprawny status operacyjny, lecz nieświadomie dostarczają awionice błędne dane o pozycji. Skalę tego zjawiska obrazuje fakt, że w styczniu 2024 roku średnia dzienna liczba lotów raportujących anomalie typu spoofing wynosiła na świecie około 300. Zaledwie w sierpniu tego samego roku wskaźnik ten osiągnął pułap 1500 lotów dziennie, co oznacza pięciokrotny wzrost intensywności zjawiska w ciągu zaledwie siedmiu miesięcy [OPSGROUP 2024].

3.3. Skutki operacyjne na przykładzie portu lotniczego w Tartu

Analiza wpływu zakłóceń spektrum elektromagnetycznego na bezpieczeństwo operacji lotniczych znajduje swoje krytyczne i praktyczne odzwierciedlenie w incydentach odnotowanych wiosną 2024 roku w estońskim porcie lotniczym w Tartu (TAY). Przypadek ten stanowi kluczowy materiał badawczy, obrazujący realne konsekwencje braku redundancji systemów nawigacyjnych w strefie działania środków WRE.

W kwietniu 2024 roku fiński przewoźnik narodowy Finnair, będący jedynym operatorem obsługującym regularne połączenia do Tartu, odnotował eskalację problemów z integralnością sygnału GNSS. Specyfika lotniska w Tartu polegała na tym, że procedury podejścia do lądowania opierały się tam niemal wyłącznie na sygnale satelitarzym (PBN). Port nie dysponował w pełni funkcjonalnymi, naziemnymi alternatywami (takimi jak system ILS). Uzależnienie operacji lotniczych od nawigacji satelitarnej bez zabezpieczenia konwencjonalnego uczyniło ten port wysoce podatnym na ataki. [OPSGROUP 2024].

Kulminacja zagrożeń nastąpiła pod koniec kwietnia, kiedy to dwa rejsowe statki powietrzne Finnair zmuszone były do przerwania procedury lądowania i powrotu do lotniska zapasowego w Helsinkach. Wynikało to bezpośrednio z utraty wiarygodnych danych pozycyjnych. W konsekwencji tych zdarzeń przewoźnik podjął bezprecedensową decyzję o tymczasowym zawieszeniu wszystkich operacji na tej trasie na okres całego miesiąca.

Reakcja estońskiej służby żeglugi powietrznej (EANS) na ten kryzys była natychmiastowa i polegała na pilnej modyfikacji procedur dolotowych. Wdrożono procedury oparte na konwencjonalnych pomocach radionawigacyjnych, wykorzystujące naziemne urządzenia pomiaru odległości (DME). Technologia ta jest całkowicie niezależna od konstelacji satelitarnych, a tym samym odporna na typowe zakłócenia GNSS. Dzięki skutecznej implementacji metod alternatywnych i zapewnieniu redundancji, Finnair wznowił operacje do Tartu z początkiem czerwca 2024 roku [OPSGROUP 2024]. Przypadek Tartu dowodzi w sposób empiryczny, że w obecnym środowisku

bezpieczeństwa model oparty wyłącznie na systemach GNSS jest obciążony nieakceptowalnym ryzykiem dla ciągłości logistycznej lotnictwa cywilnego.

4. TECHNICZNE I OPERACYJNE METODY MINIMALIZACJI SKUTKÓW

Wobec obszarowego charakteru zagrożeń w domenie elektromagnetycznej, konieczne jest wdrożenie kompleksowej strategii mitygacji ryzyka. Opiera się ona na trzech głównych filarach:

- Redundancja infrastruktury naziemnej: Kluczowym elementem obrony jest koncepcja Minimalnej Sieci Operacyjnej (MON), która zapewnia niezależne od przestrzeni kosmicznej źródła pozycji. Opiera się ona m.in. na nawigacji obszarowej DME/DME. Stacje DME pracują w paśmie UHF (960–1215 MHz), co częstotliwościowo separuje je od pasm GNSS. Dodatkowo wysoka moc nadajników naziemnych i impulsowy charakter sygnału czynią ten system niezwykle trudnym do skutecznego zagłuszenia na dużym obszarze,

- Zwiększenie odporności sprzętowej: Odbiorniki pokładowe modyfikuje się poprzez zastosowanie anten z kontrolowaną charakterystyką promieniowania (CRPA). Umożliwiają one cyfrowe formowanie wiązki i tworzenie tzw. „zera” (obszaru o minimalnym wzmocnieniu) w kierunku zidentyfikowanego źródła zakłóceń. Z kolei docelowym rozwiązaniem awionicznym jest wdrożenie odbiorników wieloczęstotliwościowych i wielokonstelacyjnych (DFMC), przetwarzających jednocześnie np. sygnały GPS (L1/L5) oraz Galileo (E1/E5a), co drastycznie podnosi trudność przeprowadzenia skutecznego ataku WRE,

- Procedury operacyjne i monitoring: Wymaga się od załóg ograniczonego zaufania do wskazań satelitarnych. W przypadku podejrzenia spoofingu rekomenduje się manualną deseleksję sensora GNSS (odłączenie GPS w systemie zarządzania lotem), co wymusza przejście awioniki w bezpieczny tryb nawigacji inercyjnoradiowej. Działania te wspierane są przez organy kontroli ruchu lotniczego, które wykorzystują systemy ADS-B do detekcji nagłych spadków wskaźnika integralności nawigacji (NIC) u wielu statków powietrznych jednocześnie.

5. PODSUMOWANIE

Zakłócanie i fałszowanie sygnałów GNSS w rejonie Europy ŚrodkowoWschodniej ewoluowało z incydentów o charakterze losowym do systemowego zjawiska o charakterze ciągłym i obszarowym. Ze względu na fizyczne ograniczenia systemów satelitarnych, wynikające z ekstremalnie niskiej mocy sygnału użytecznego w punkcie odbioru, lotnictwo cywilne wymaga powrotu do koncepcji hybrydowych. Jak udowodnił

przypadek lotniska w Tartu, oparcie modelu operacyjnego wyłącznie na efektywnościowych systemach GNSS generuje nieakceptowalne ryzyko dla ciągłości łańcuchów komunikacyjnych. Gwarantem bezpieczeństwa pozostaje utrzymanie rezerwowej, naziemnej infrastruktury radionawigacyjnej połączone z równoległą modernizacją awioniki do standardów CRPA i DFMC.

LITERATURA

1. 3GIMBALS, 2023, Russian Electronic Warfare Systems: Analytic Insight Report.
2. Aireon, 2024, GPS interference and spoofing in the Baltics, White Paper, maj 2024.
3. C4ADS, 2019, Above Us Only Stars: Exposing GPS Spoofing in Russia and Syria, Center for Advanced Defense Studies, Waszyngton.
4. Corrigan T.M., et al., 1999, GPS Risk Assessment Study: Final Report. VS-99-007, The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel.
5. EASA, 2022, Global Navigation Satellite System (GNSS) Outages and Alterations, Safety Information Bulletin (SIB) 2022-02R3, European Union Aviation Safety Agency, Kolonia.
6. ICAO, 2013, Performance-based Navigation (PBN) Manual, Doc 9613, Fourth Edition, International Civil Aviation Organization, Montreal.
7. ICAO, 2017, Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual, Doc 9849, International Civil Aviation Organization, Montreal.
8. Magiera J., Katulski R., 2014, Technika ochrony odbiorników GPS przed atakami typu spoofing, Przegląd Komunikacyjny, nr 11, s. 19-21.
9. OPSGROUP, 2024, GPS Spoofing: Final Report, OPSGROUP Workgroup, wrzesień 2024.
10. Smura T., 2016, Russian Anti-Access Area Denial (A2AD) capabilities - implications for NATO, Pulaski Policy Papers, nr 29, Fundacja im. Kazimierza Pułaskiego, Warszawa.
11. SVT, 2025, 123,000 flights had problems due to GPS failure, source of interference in Russia, raport szwedzkiej telewizji publicznej SVT na podstawie danych przedłożonych do ICAO, www.svt.se (dostęp 30.03.2026)
12. Tippenhauer N.O., et al., 2011, On the Requirements for Successful GPS Spoofing Attacks, Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS), ACM

ANALYSIS OF THE IMPACT OF DELIBERATE JAMMING AND SPOOFING OF SATELLITE NAVIGATION SIGNALS ON AIR TRAFFIC SAFETY

Abstract

The article analyses the impact of deliberate jamming and spoofing of Global Navigation Satellite System (GNSS) signals on civil aviation safety. Physical conditions determining the susceptibility of navigation signals to interference are discussed, alongside the identification of electronic warfare emission sources in Central and Eastern Europe. A statistical analysis of incident data from 2021-2025, collected within the ECCAIRS system, is presented, with particular focus on the Warsaw Flight Information Region (FIR). Furthermore, the operational consequences of GNSS disruptions are examined through the case study of Tartu Airport. The findings confirm the systemic nature of the threat. Technical and operational risk mitigation methods are proposed, including the Minimum Operational Network (MON) concept and avionics resilience enhancements.

Keywords: GNSS, spoofing, jamming, aviation safety

Anna WIKTOROWSKA-JASIK*

Adrianna JASIK**

MOŻLIWOŚCI I OGRANICZENIA WYKORZYSTANIA CZYSTEJ ENERGII W TRANSPORCIE I LOGISTYCE

Wykorzystanie czystej energii w transporcie i logistyce oznacza stosowanie odpowiednich technologii i źródeł energii, które ograniczą negatywny wpływ tego sektora na otoczenie. Wprowadzenie działań redukujących emisję CO₂, hałasu i zanieczyszczeń jest niezbędne i wynika zarówno z regulacji prawnych jak i rosnącej świadomości ekologicznej społeczeństwa. Celem artykułu jest przeanalizowanie możliwości i ograniczeń wykorzystania czystej energii w sektorze transportu i logistyki. Przedstawiono wybrane technologie i innowacje, które umożliwiają realizację procesów przewozowych i magazynowych, zgodnie z zasadami zielonej logistyki. Wskazano główne bariery jakie muszą zostać pokonane aby czysta energia stała się wiodącym źródłem energii w sektorze transportu i logistyki.

Słowa kluczowe: czysta energia, odnawialne źródła energii, niskoemisyjne pojazdy, zielona logistyka

1. WPROWADZENIE

W transporcie i logistyce czysta energia oznacza wykorzystanie energii pochodzącej głównie z odnawialnych źródeł, czyli: tzw. zielonego wodoru i energii elektrycznej uzyskanej z wiatru i słońca. Jest to obecnie najważniejszy kierunek zmian, określane jako: zielony transport lub zielona logistyka [Ziółko 2023]. Aktualnie określenie to często odnoszone jest już do całej branży jako „zielony TSL”. Potrzeba przejścia na takie rozwiązania wynika

*Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

**Wydział Ekonomii, Finansów i Zarządzania, Uniwersytet Szczeciński

z europejskiej polityki transportowej, która zakłada dążenie do neutralności klimatycznej całego sektora transportu. Czysta energia w transporcie i logistyce rozumiana jest jako wykorzystanie technologii i źródeł energii, które ograniczają emisję CO₂ i innych zanieczyszczeń do atmosfery. Ponadto oczekuje się jednoczesnego wzrostu efektywności energetycznej i ekonomicznej całego łańcucha dostaw [Dziedzic i Ziółko 2022]. Realizacja tych założeń napotyka jednak na różne bariery, w tym: techniczne, infrastrukturalne, ekonomiczne, organizacyjne itd. Szczególnie widoczne jest to na przykładzie infrastruktury miejskiej, która zarówno w układzie ulicznym jak i np. stacji ładowania pojazdów elektrycznych, a w przyszłości wodorowych nie jest dostosowana do tak dużego natężenia ruchu [Bielińska-Dusza i Hamerska i Żak]. Głównym problemem infrastrukturalnym jest ścisła zabudowa centrum miast, która nie pozwala na wprowadzenie zmian ze względu na brak miejsca. Transport w mieście jest dziś ukierunkowywany na elektromobilność i niezbędna jest infrastruktura ładowania [Brach et al. 2021]. Natomiast pojazdy wodorowe wymagają jeszcze większych nakładów na budowę infrastruktury ich ładowania, która dzisiaj jest jeszcze w fazie planowania.

2. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA CZYSTEJ ENERGII W TRANSPORCIE I LOGISTYCE

Branża transportowo-logistyczna odgrywa istotną rolę w kształtowaniu zrównoważonego łańcucha dostaw. Z tego powodu wprowadzane są zmiany ukierunkowane na wdrażanie ekologicznych rozwiązań, które wpływają na zmniejszenie zapotrzebowania na energię, optymalizację kosztów, zwiększenie wydajności i efektywności procesów. Najczęściej oznacza to poszukiwanie alternatyw dla tradycyjnych modeli transportu, głównie w zakresie źródeł energii i sposobów zasilania pojazdów i innych urządzeń transportowych [Brach 2022]. Działania takie są podejmowane nie tylko jako konieczność narzuconą przez regulacje prawne ale coraz częściej firmy transportowo-logistyczne wybierają je dobrowolnie. Dostrzegają w tym działaniu wymierne korzyści finansowe i organizacyjne jak również społeczne i wizerunkowe. Stosowanie zasad zielonej logistyki oznacza redukcję zużycia paliw kopalnych, ograniczenie emisji gazów cieplarnianych i mniejszą ilość odpadów, co tym samym przekłada się na zwiększenie zysków i budowanie trwałej przewagi konkurencyjnej. [Carlan, Sys i Vanelslander 2019]. Dostosowanie działań

przedsiębiorstwa do nowych standardów nie musi zawsze oznaczać kosztownych inwestycji. Często wiele z nich może zostać wprowadzonych przy niskim nakładzie finansowym, a dodatkowo przynieść oszczędności, np. poprzez reorganizację tras, wdrożenie systemów telematycznych oraz ecodriving. Stosowanie zasad ecodrivingu pozwala ograniczyć wykorzystanie paliw kopalnych bez konieczności modernizacji floty. Ponadto poprawia bezpieczeństwo jazdy i ogranicza wskaźnik uszkodzenia ładunku. Jest to rozwiązanie, które odpowiada na potrzeby neutralności klimatycznej oraz zmniejsza zużycie zasobów i obniża ogólne koszty logistyczne [Jaroszek i Wieszała 2011]. Wprowadzenie monitoringu stylu jazdy kierowcy i odpowiedniego systemu premiowania za ekonomiczne prowadzenie pojazdu powinno być elementem zrównoważonej polityki firmy. Ecodriving jest przykładem najprostszych działań, jakie można wdrożyć w celu realizacji założeń zielonej logistyki oraz poprawy efektywności transportu.

W całym sektorze transportu i logistyki szczególne działania są prowadzone w zakresie wykorzystania czystej energii do zasilania środków transportu oraz realizacji procesów [Brach 2020]. Należą do nich:

- Wykorzystanie pojazdów elektrycznych w dostawach ostatniej mili. Najczęściej są to elektryczne samochody dostawcze tzw. (e-VANs), rowery cargo i elektryczne skutery. Takie rozwiązania są efektywne w gęstej zabudowie miejskiej, gdzie dystanse są krótkie.
- Ładowanie pojazdów elektrycznych z OZE. Korzystanie stacji ładowania zasilanych energią z farm wiatrowych lub słonecznych.
- Budowa mikrocentrów dystrybucyjnych. Obiekty takie umożliwiają konsolidację ładunków na obrzeżach miast i ich dalszą dystrybucję. Pozwala to na optymalizację zużycia energii, gdyż dystrybucja odbywa się z wykorzystaniem mniejszych i bardziej ekologicznych pojazdów (głównie elektrycznych).
- Inteligentne zarządzanie flotą. Działanie takie umożliwia optymalizację tras dostaw, głównie poprzez wykorzystanie sztucznej inteligencji, co pozwala zmniejszyć zużycie energii i zminimalizować puste przebiegi.
- Wykorzystanie pojazdów wodorowych w transporcie ciężkim: W transporcie ładunków jak i w cięższych środkach transportu miejskiego, wodór jest obiecującą technologią, gdyż zapewnia większy zasięg niż baterie elektryczne.
- Biopaliwa i Hydrotreated Vegetable Oil (HVO). To rozwiązanie może być stosowane jako wspomagające, pozwalające na redukcję emisji CO₂ w silnikach diesla bez konieczności ich wymiany.

- Wprowadzanie Stref Czystego Transportu w miastach wymusza zmianę i modernizację floty na mniej szkodliwą dla środowiska i ludzi, co stanowi istotny czynnik zakupu pojazdów elektrycznych i hybrydowych.
- Wykorzystanie sztucznej inteligencji (AI) w optymalizacji tras. Technologia AI umożliwia optymalne planowanie tras, co może istotnie zmniejszyć zużycie energii i ograniczyć puste przebiegi.

Możliwości wykorzystania czystej energii w transporcie i logistyce to nie tylko elektryczne pojazdy ale również i zmiany w magazynowaniu. Współcześnie cała logistyka magazynowa ukierunkowana jest na tzw. zielone magazyny, czyli na budowę i eksploatację obiektów, które są tak projektowane aby minimalizować wpływ na środowisko [Buła i Staszkiwicz 2025]. Zielona logistyka magazynowa, zwykle oznacza:

- Montowanie paneli fotowoltaicznych na dachach magazynów, co umożliwia zasilanie wózków widłowych, oświetlenia i systemów automatyki magazynowej, w tym systemów magazynowych energią produkowaną na miejscu.
- Budowa magazynów energii, które pozwalają gromadzić nadmiar energii z fotowoltaiki i wykorzystywać ją do ładowania elektrycznej floty w nocy lub podczas mniejszego nasłonecznienia.
- Montowanie pomp ciepła i oświetlenia LED dla poprawy optymalizacji energetycznej budynków magazynowych..

Takie obiekty magazynowe charakteryzują się energooszczędnością, zwykle potwierdzoną certyfikatem ekologicznym (LEED, BREEAM) oraz zrównoważonym zarządzaniem. Magazyny energię pobierają z odnawialnych źródeł energii, a ponadto posiadają nowoczesną izolację, oświetlenie LED, systemy oszczędzania wody itp. [Mardeusz 2021]. Realizowane w nich procesy magazynowo-transportowe są optymalizowane, co pozwala na redukcję kosztów operacyjnych oraz zmniejszenie emisji zanieczyszczeń.

3. OGRANICZENIA I BARIERY WYKORZYSTANIA CZYSTEJ ENERGII W TRANSPORCIE I LOGISTYCE

W transporcie i logistyce wykorzystanie czystej energii, pochodzącej głównie z odnawialnych źródeł energii, wodoru i biopaliw napotyka na szereg barier i ograniczeń [Pasternak i Sadowski 2015]. Do głównych należą: wysokie koszty wdrażania zmian, ukierunkowanych na stosowanie czystej energii, ograniczona infrastruktura ładowania pojazdów elektrycznych i wodorowych oraz trudności techniczne związane z wydajnością baterii w transporcie ciężkim. W tab. 1 przedstawiono główne kategorie barier wykorzystania czystej energii w transporcie i logistyce.

Tabela 1

Bariery i ograniczenia wykorzystania czystej energii w transporcie i logistyce

Kategoria barier	Główne czynniki	Opis
Infrastrukturalno-sieciowe	Niewystarczająca infrastruktura ładowania	Brak lub niewystarczająca liczba ogólnodostępnych stacji szybkiego ładowania dla samochodów ciężarowych i pojazdów miejskich.
	Problemy z siecią energetyczną	Przeciążenie sieci przesyłowych i trudności z przyłączeniem nowych stacji ładowania o dużej mocy.
	Brak odpowiedniej infrastruktury w bazach transportowo-logistycznych	Konieczność modernizacji magazynów i centrów logistycznych pod kątem jednoczesnego ładowania wielu pojazdów elektrycznych.
Technologiczno-operacyjne	Ograniczony zasięg i ładowność pojazdów	Baterie zmniejszają ładowność pojazdu, a ograniczony zasięg jest problemem przy długich trasach dostawczych.
	Długi czas ładowania	Znacznie dłuższy czas ładowania powoduje konieczność planowania przerw, zmniejsza elastyczność operacyjną w intensywnej logistyce miejskiej.
	Niska dostępność niektórych technologii alternatywnych	Alternatywne paliwa (np. wodór) i ciężarowe samochody elektryczne są wciąż drogie i w fazie rozwojowej, podobnie jak technologia autonomicznych ciężarówek elektrycznych.
	Wyzwania w transporcie długodystansowym	Lotnictwo i morski transport dalekiego zasięgu nie mają wystarczających alternatyw z powodu braku wydajnych napędów elektrycznych.
Ekonomiczno-finansowe	Wysokie koszty wdrażania	Zakup pojazdów elektrycznych i wodorowych jest znacznie wyższy niż pojazdów spalinowych.
	Niestabilność cen energii	Zmienność cen energii elektrycznej i paliw alternatywnych utrudnia planowanie kosztów operacyjnych
	Trudności w finansowaniu inwestycji	Ograniczone możliwości finansowania inwestycji przez mniejsze firmy transportowe.

Bariery i ograniczenia wykorzystania czystej energii w transporcie i logistyce

Prawno-administracyjne	Trudności administracyjno-proceduralne	Skomplikowane procedury uzyskiwania pozwoleń na budowę stacji ładowania i przyłącza energetyczne. Trudności w wyznaczaniu miejsc pod ładowarki w centrach miast oraz skomplikowane przepisy dotyczące budowy magazynów energii.
	Luki w przepisach prawnych	Brak spójnych standardów i polityk wspierających „zieloną logistykę” w transporcie międzynarodowym.
	Sztuczne obniżanie cen paliw kopalnych	Polityka wsparcia paliw tradycyjnych utrudnia konkurencyjność zielonych rozwiązań.
Behawioralno-organizacyjne	Opór przed zmianą	Przyzwyczajenie do tradycyjnych napędów i brak wiedzy na temat eksploatacji pojazdów zeroemisyjnych.
	Brak wykwalifikowanej kadry	Deficyt specjalistów z zakresu zarządzania flotami elektrycznymi i infrastrukturą ładowania.

Przedstawione bariery, jednak nie powodują zmian w myśleniu, że transformacja energetyczna w sektorze transportu i logistyki jest konieczna. Natomiast mimo, że ta potrzeba jest powszechnie rozumiana to przechodzenie na czystą energię napotyka szereg barier i ograniczeń.

4. INNOWACJE W TRANSPORCIE I LOGISTYCE ZWIĄZANE Z WYKORZYSTANIA CZYSTEJ ENERGII

W dzisiejszych czasach, gdy zmiany klimatyczne są faktem potrzeba poszukiwania rozwiązań w zakresie zredukowania negatywnego wpływu transportu i logistyki na środowisko jest koniecznością. Niezbędne są działania innowacyjne w całym sektorze, które ukierunkują go na czystą energię [Gąsiorek-Kowalewicz i Zarębski i Suchodolski]. Jednym z nich i najczęściej stosowanym jest elektryfikacja floty, która zasilana jest energią pochodzącą z odnawialnych źródeł, są nimi często własne farmy fotowoltaiczne. Podejście takie obecnie stanowi najsilniejszy nurt zmierzający głównie w logistyce miejskiej, np. w przewozach ostatniej mili [Zarębska i Żabińska i Zarębski 2019]. Elektryfikacja floty ma miejsce również w transporcie ciężkim, w którym coraz częściej e-Trucks (elektryczne samochody ciężarowe) wykorzystywane są do bezemisyjnego transportu towarów, głównie w dystrybucji regionalnej. Takie elektryczne ciągniki siodłowe o zasięgu 500–800 km

wprowadziły już m.in. Tesla, Volvo, Mercedes-Benz. Przykładem następnej innowacji jest Megawatt Charging System (MCS). Jest to standard ładowania o mocy przekraczającej 1 MW, który pozwala naładować akumulatory ciężarówki w krótkim czasie, np. podczas obowiązkowej przerwy kierowcy. Rozważana jest również technologia szybkiej wymiany rozładowanych akumulatorów na pełne w specjalnych stacjach tzw. Battery Swapping. To rozwiązanie co eliminuje konieczne przestoje na ładowanie. Kolejną ważną innowacją jest rozwój wodorowych ogniw paliwowych (FCEV). Wdrożenie tego rozwiązania czyli niskoemisyjnych pojazdów ciężarowych jest szczególnie ważne w transporcie ciężkim długodystansowym [Wojewódzka-Król 2024]. Przewiduje się, że największą szansą jest podejście hybrydowe czyli łączenie elektromobilności i wodoru. Natomiast największym ograniczeniem jest czas i kapitał potrzebny na budowy infrastruktury. Wybrane innowacje i działania zostały przedstawione w tab. 2.

Tabela 2

Innowacje i działania związane z wykorzystaniem czystej energii w transporcie i logistyce

Innowacja	Opis
(MCS) - Megawatt Charging System	Standard ładowania o mocy przekraczającej 1 MW, który pozwala naładować akumulatory w czasie obowiązkowej przerwy kierowcy (45 min).
Battery Swapping	Technologia szybkiej wymiany rozładowanych akumulatorów na pełne w specjalnych stacjach.
Automatyzacja procesów	Wykorzystanie robotów i dronów w magazynach oraz transporcie pozwala na zwiększenie wydajności oraz redukcję błędów, co przekłada się na oszczędności.
Zarządzanie danymi w czasie rzeczywistym	Nowoczesne systemy analityczne umożliwiają śledzenie i optymalizację łańcucha dostaw w czasie rzeczywistym co wpływa na lepsze zarządzanie np. poziomem zapasów.
Wodór i biopaliwa	Technologie te stają się bardziej dostępne i stanowią kluczowe, bezemisyjne alternatywy dla paliw kopalnych.
Autonomiczne pojazdy	Poruszają się bez udziału człowieka, do omijania przeszkód wykorzystują radary, GPS i sztuczną inteligencję.
Zielone magazyny	Do realizacji procesów magazynowych energię pobierają z własnych odnawialnych źródeł energii, posiadają systemy oszczędzania wody itp.

W sektorze transportu i logistyki bardzo obiecującą innowacją są autonomiczne pojazdy, które stają się istotnym elementem nowoczesnej logistyki [Koliński i Adamczak 2025]. Wyznacza ona nowe standardy w efektywności operacyjnej. Wprowadzenie pojazdów autonomicznych do transportu ma na celu nie tylko zwiększenie

wydajności, ale również redukcję kosztów oraz poprawę bezpieczeństwa. Przykładowe możliwości i ograniczenia wykorzystania autonomicznych pojazdów w logistyce przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3

Możliwości i ograniczenia wykorzystania autonomicznych pojazdów w logistyce

Możliwości	
Optymalizacja tras	Systemy nawigacyjne oparte na sztucznej inteligencji, w które są wyposażone pojazdy autonomiczne umożliwiają szybsze i dokładniejsze obliczenie najbardziej efektywnej trasy, co skraca czas dostawy.
Zmniejszenie kosztów pracowniczych	Brak kierowców może znacząco obniżyć koszty, co korzystnie wpływa na całkowite koszty operacji transportowych.
Większa precyzja	Dzięki zaawansowanym czujnikom i systemom monitorowania, autonomiczne pojazdy minimalizują ryzyko błędów w dostawach.
Ograniczenia	
Regulacje prawne	Brakuje norm branżowych dotyczących bezpieczeństwa i odpowiedzialności za autonomiczne systemy transportowe, co hamuje ich rozwój.
Infrastruktura	Wiele istniejących dróg i systemów logistycznych nie jest dostosowanych do obsługi autonomicznych pojazdów, co może wpłynąć na ich efektywność.
ceptacja społeczna	Obawy dotyczące bezpieczeństwa oraz wpływu na zatrudnienie mogą ograniczać publiczne wsparcie dla tej technologii.

Współcześnie mimo ograniczeń technologia autonomicznych pojazdów jest fazie intensywnego rozwoju. Wiele firm inwestuje w badania i oczekuje rozwiązań, które pozwolą zintegrować pojazdy autonomiczne z istniejącymi w łańcuchach dostaw. Stąd też, w najbliższych latach należy spodziewać się jeszcze większego wpływu tej technologii na branżę logistyczną. Ma to szczególne znaczenie, gdyż wydajność procesów logistycznych staje się coraz bardziej kluczowa w relacji z klientem. W przyszłości autonomiczne pojazdy mogą atak się nieodłącznym elementem nowoczesnych strategii przewozowych.

5. PODSUMOWANIE

Transformacja energetyczna w transporcie i logistyce jest konieczna i wymaga wdrożenia wielu zmian, zarówno na poziomie całego sektora, jak i poszczególnych przedsiębiorstw. Dotyczy to głównie zakupu niskoemisyjnych pojazdów jak i inwestycji w nowe technologie. Przejście na czystą energię wiąże się z rozbudową infrastruktury ładowania pojazdów niskoemisyjnych, zarówno elektrycznych jak i wodorowych. Niezbędne jest również budowanie nowoczesnych obiektów magazynowych, które charakteryzują się energooszczędnością, mają systemy oszczędzania wody i ergonomiczne systemy funkcjonowania. Istotne są również zmiany w zakresie innowacyjnego podejścia do planowania dostaw, opartych o mikrohuby, rowery cargo itp. Współcześnie zielona logistyka postrzegana jest jako szansa dla przedsiębiorstw, gdyż wyróżnia je jako dbające o środowisko naturalne. Jest również drogą do ograniczenia kosztów i poprawy efektywności. Czysta energia w transporcie i logistyce związana jest z głównie z wdrażaniem nowoczesnych i ekologicznych rozwiązań.

LITERATURA

1. Bielińska-Dusza E., Hamerska M., Żak, A., 2021, Sustainable Mobility and the Smart City: A Vision of the City of the Future: The Case Study of Cracow (Poland), *Energies*, 14(23).
2. Brach J., 2020, Dostawy w nocy oszczędzają czas i redukują emisje, *Ciężarówki i Autobusy*, 2020, nr 3-4.
3. Brach J., 2022, Zastosowanie paliw alternatywnych i alternatywnych zespołów napędowych w samochodach ciężarowych klas tonażowych średniej i ciężkiej w warunkach zachodnioeuropejskich, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław.
4. Brach J., Wojtowski B., 2021, Wybrane aspekty usprawniania dostaw w logistyce ostatniej mili. Wyzwania dla współczesnych miast, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław.
5. Buła T., Staszkievicz J., 2025, Źródła energii w logistyce i transporcie – magazyny energii i zielona infrastruktura transportu drogowego i logistyki miejskiej, Wydawnictwo Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, Gdynia.
6. Carlan V., Sys C., Vanelslander T., 2019, Innovation in road freight transport: quantifying the environmental performance of operational cost-reducing practices, *Sustainability*, Vol. 11(8), s. 1-26.
7. Dziedzic D., Ziółko M., 2022, Odnawialne źródła energii w logistyce, CeDeWu, Warszawa.

8. Gąsiorek-Kowalewicz A., Zarębski A., Suchodolski O., 2025, Ekoinnowacje: przykład inwestycji w bezemisyjny transport w Miejskim Zakładzie Komunikacji Sp. z o.o. w Zielonej Górze, *Studia z Polityki Publicznej*, t. 12, nr 2.
9. Jaroszek M., Wieszała R., 2011, Wpływ prędkości pojazdu na wielkość emisji spalin na miejskim odcinku drogowym, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Transport*, nr 70.
10. Koliński A., Adamczak M., 2025, Innowacyjne technologie w logistyce-koncepcja zrównoważonego rozwoju, Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, Inowrocław.
11. Mardeusz E., 2021, Ekologiczne rozwiązania w magazynach, *Journal of Translogistics*, t. 7, nr 1.
12. Pasternak Ł., Sadowski A., 2015, Bariery i ograniczenia w logistyce miejskiej, *Studia Miejskie*, t. 15.
13. Wojewódzka-Król K., 2024, Innowacje w transporcie. Mobilność: ekologia, efektywność, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
14. Zarębska, J., Żabińska, I., Zarębski, A., 2019, Eco-Innovations in Poland – The Extent of Changes, Development and Barriers, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Organizacja i Zarządzanie*, s. 245–256.

POSSIBILITIES AND LIMITATIONS OF USING CLEAN ENERGY IN TRANSPORT AND LOGISTICS

Abstract

The use of clean energy in transport and logistics involves the application of appropriate technologies and energy sources that will reduce the sector's negative impact on the environment. The introduction of measures to reduce CO₂ emissions, noise and pollution is essential, as it is driven both by legal regulations and by the public's growing environmental awareness. The aim of this article is to analyse the possibilities and limitations of using clean energy in the transport and logistics sector. Selected technologies and innovations are presented which enable transport and warehousing processes to be carried out in accordance with the principles of green logistics. The most significant barriers that must be overcome for clean energy to become the primary source for carrying out tasks in the transport and logistics sector are highlighted.

Keywords: clean energy, renewable energy sources, low-emission vehicles, green logistics

Karolina WYŹKIEWICZ*
Damian JOACHIMIAK*

POMIAR TEMPERATURY W CIAŁACH STAŁYCH – ANALIZA LITERATURY ORAZ PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

W artykule dokonano przeglądu literatury dotyczącej dokładności pomiaru temperatury. Zwrócono szczególną uwagę na warunki pomiarowe takie jak geometria, metoda pomiaru, ośrodek w którym dokonywany był pomiar, obciążenie cieplne elementów pomiarowych, metody korekcji błędów pomiaru, obliczenia numeryczne i eksperyment. W dalszej części pracy skupiono się na pomiarze temperatury w ciałach stałych przy użyciu termoelementu płaszczonego z izolowaną spoiną. Przeanalizowano czynniki wpływające na błąd pomiaru. W ramach pracy dokonano wstępnych badań eksperymentalnych nagrzewania geometrii walcowej. Na podstawie danych pomiarowych za pomocą zagadnienia odwrotnego wyznaczono warunki brzegowe przepływu ciepła, które były danymi do symulacji numerycznych. Dokonano symulacji dwóch wariantów geometrii gdzie w pierwszej odtworzono nawiercenie z umieszczonym termoelementem i jego budową wewnętrzną. Drugim wariantem był pełny walec. Następnie określono różnicę temperatury spoiny pomiędzy tymi przypadkami.

Słowa kluczowe: pomiar temperatury, termoelement, błąd pomiaru, symulacja numeryczna

1. WPROWADZENIE

W systemach obronnych, elementach dział bardzo istotna jest kontrola temperatury. Konieczność kontroli temperatury wynika z bardzo dużych obciążeń cieplnych występujących w lufach dział i karabinów [Chen et al. 2023]. Przegrzanie lufy może spowodować zbyt wysoką temperaturę oraz przekroczenie naprężeń termicznych wierzchnich warstw materiału. Skutkiem tego mogą pojawić się odkształcenia lub pęknięcia powierzchni wewnętrznej [Zieliński et al. 2022]. Badania dotyczące analizy

* Politechnika Poznańska, Instytut Energetyki Ciepłej.

przepływu ciepła w lufach, gdzie pomiar temperatury jest bardzo zmienny w czasie, mogą pozwolić na optymalne wykorzystanie dział i karabinów bez ich zniszczenia.

Do pomiaru temperatury w ciałach stałych najczęściej wykorzystuje się termoelementy płaszczowe z izolowaną spoiną. Płaszcz termoelementu chroni spoinę pomiarową od oddziaływania środowiska (wpływ: wilgoci, korozji). Geometria ze spoiną izolowaną umożliwia wyeliminowanie wpływu zakłóceń elektrycznych w badanym materiale, którym zazwyczaj jest stal. Dla pomiaru temperatury w wymienionych geometriach istotne znaczenie mają czynniki wpływające na dokładność pomiaru w czasie jego trwania. W przypadku pomiaru temperatury w wybranym punkcie ciała stałego za pomocą termoelementu płaszczowego z izolowaną spoiną są nimi:

- opór stykowy pomiędzy powierzchniami nawiercenia a płaszczem termoelementu,
- opór przepływu ciepła w poszczególnych warstwach termoelementu płaszczowego,
- efekt odprowadzania ciepła z miejsca pomiaru przez płaszcz termoelementu wzdłuż termoelementu.

Wymienione czynniki powodują występowanie błędu pomiaru temperatury, który jest trudny do określenia i często pomijany.

2. ANALIZA LITERATURY

W przypadku pomiaru temperatury zmiennego w czasie może pojawić się błąd pomiaru temperatury wynikający z kontaktowych oporów przepływu ciepła oraz masywności części pomiarowej termoelementu. Wymienione przyczyny błędów mogą być znacznie większe niż błąd pomiarowy samego termoelementu. W niektórych przypadkach np. dla obrabianych cieplnie lub cieplno-chemicznie elementów pomiar jest niemożliwy lub obarczony dużym błędem [Joachimiak, Joachimiak, Frąckowiak 2024]. W innych przypadkach nie ma możliwości bezpośredniego pomiaru temperatury na powierzchni. Może to być spowodowane zbyt wysoką temperaturą np. w wyniku intensywnego nagrzewania aerodynamicznego występującego podczas wchodzenia w atmosferę statków kosmicznych [Kumar i Mahulikar 2016]. Niekorzystne warunki występują również w elementach maszyn tłokowych, silników spalinowych na powierzchni tulei cylindrowej. W tych warunkach występuje mocno zmienne w czasie obciążenie cieplne. Przy dużym obciążeniu cieplnym może występować również radiacja np. w komorze spalania silnika raketowego co może dodatkowo powodować powstanie zmian geometrycznych i zakłóceń przepływu w pobliżu czujnika umieszczonego na powierzchni elementu. W wymienionych przypadkach na podstawie pomiaru temperatury w analizowanym elemencie można poprzez rozwiązanie zagadnienia odwrotnego wyznaczyć nieznanne warunki brzegowe przepływu ciepła na powierzchni analizowanego elementu, a następnie poprzez zagadnienie bezpośrednie symulować pole temperatury w całym elemencie [Woodbury et al. 2024]. Dokładność

pomiaru temperatury ma bezpośredni i duży wpływ na precyzję określenia warunków brzegowych przepływu ciepła. Dokładne określenie strumienia ciepła ma istotne znaczenie podczas projektowania oraz obliczania obciążeń cieplnych [Vicentin et al. 2019].

Literatura dostarcza niewiele informacji na temat oporów stykowych. Dane dotyczące oporów stykowych dla konfiguracji powierzchnia stali – powierzchnia stali są dostępne, ale nie dla konfiguracji otwór – płaszcz termoelementu oraz metod poprawy przepływu ciepła pomiędzy ściankami otworu a płaszczem termoelementu.

Najczęściej pojawiającymi się zagadnieniami dotyczącymi pomiaru temperatury przy zastosowaniu termoelementu są pomiary temperatury gazu lub pomiary temperatury ścianki opływanej przez płyn. Zagadnienie błędów związanych z przepływem ciepła przy pomiarze temperatury termoelementem w silniku lotniczym przeanalizowali Kou et al. [2024]. Autorzy wykonywali symulacje numeryczne termoelementu umieszczonego płasko na ścianie opływanej przez gorące powietrze. Druga strona ściany była opływana przez zimne powietrze. Autorzy zbadali wpływ zastosowania dodatkowej osłonki nad termoelementem. Analiza dotyczyła pancernych termoelementów typu K. Głowica termopary pancernej miała kształt półkuli o średnicy 1 mm i długości przewodu 20 mm. Zewnętrzny materiał osłony ochronnej pancernego termoelementu wykonany był z superstopu GH3030, wewnątrz znajdował się tlenek magnezu (MgO), materiał przewodu NiCr/NiSi. Symulacje były wykonywane dla przypadku ustalonego w czasie. Porównanie wyników z eksperymentem wykazało błąd względny poniżej 5%.

Podobne badanie w oparciu o symulacje numeryczne CFD termoelementu przedstawili Zhang et al. [2024]. Badanie dotyczyło termoelementu chłodzonego wodą, który mierzył temperaturę w przepływie wewnątrz komory spalania silnika lotniczego. Autorzy zbadali wpływ chłodzenia i błędów pomiaru termoelementu na pomiary temperatury całkowitej w komorze spalania silnika.

Pomiary temperatury w ciele stałym przy użyciu termoelementu opisali między innymi Palma i Spolaore [2021]. Autorzy przedstawili opracowaną metodę pomiaru temperatury oraz strumienia ciepła na powierzchni dywertora Diverter Tokamak Test. Zaproponowany specjalny korpus nośny z termoelementem typu C był umieszczony w ściance mającej kontakt z plazmą. W symulacji numerycznej autorzy założyli idealne przewodnictwo cieplne pomiędzy ciałami stałymi. Autorzy zauważyli, że zwiększenie kontaktu termicznego pomiędzy korpusem nośnym termoelementu a powierzchnią dywertora poprzez zastosowanie przewodzącej tulei wykonanej z miedzi beztlenowej znacząco poprawia wydajność czujnika.

Eksperymentalne pomiary temperatury wewnątrz materiału kompozytowego podczas ablacji stosowanego w systemach ochrony opisali Koo et al. [2018]. Autorzy skupili się na możliwościach technologicznych wykonania otworów do umieszczenia termoelementów oraz metody montowania aby zapewnić jak najlepszy styk powierzchni.

Luo et al. [2022] zbadali wpływ dodatkowej warstwy pomiędzy elementami termoelementu na opory stykowe i wydajność termoelementu.

Wpływ metody przymocowania termoelementu na pomiar temperatury powierzchni przedstawili Genix, Vairac i Cretin [2009], wykazując podobieństwa w zachowaniu termoelementu wewnętrznego i standardowego termoelementu lutowanego. Autorzy porównywali wyniki zaproponowanej metody z wynikami pomiarów uzyskanymi przez mikrotermoelement typu K. Jako przyczynę różnic wyników podali różnicę w wymiarach geometrycznych sond oraz stwierdzili, że lepszą rozdzielczość przestrzenną można uzyskać stosując zaproponowaną przez nich technikę zamiast najmniejszego termoelementu typu K.

Różne konfiguracje przymocowania termoelementów przedstawili również Sun, Chen i Chen [2013]. Autorzy zbadali zmienną w czasie temperaturę na powierzchni ciała stałego. Stwierdzili że ich rozwiązanie ma wadę, która wynika z wysokich oporów termicznych styków, powstałych podczas spawania złączy i które wpłynęły na dodatkowe błędy pomiarów.

Nanigian i Nanigian [2006] opisali specjalny rodzaj wysokowydajnych termoelementów (NANMAC Corporation: “Self-Renewing” lub “Eroding” Thermocouple), które mogą mierzyć temperatury zmienne w czasie z czasem reakcji rzędu kilku milisekund w trudnych warunkach erozji. Koncepcja samoodnawialnego termoelementu opiera się na następujących uszkodzeniach powierzchni osłony termometrycznej, które powodują tworzenie nowego złącza i usuwaniu starych. Zaletą przedstawionego termoelementu jest również możliwość mechanicznej obróbki końca czujnika, dzięki której termoelement można dopasować do dowolnego konturu. Badany termoelement miał czas reakcji wynoszący 8 mikrosekund. Tego rodzaju termoelementy zostały wykorzystane do pomiaru śladu temperatury na przedniej krawędzi detonacyjnej fali uderzeniowej, przez szereg termoelementów umieszczonych wzdłużnie w rurze uderzeniowej. Materiał termoelementu jest taki sam jak ścianki. Autorzy zastosowali tego typu termoelementy między innymi do pomiarów temperatury materiału pędnego podczas zapłonu, pomiaru temperatury izolacji dyszy oraz do pomiaru temperatury w gardzieli dyszy wewnątrz w nawierceniach i na zewnątrz dla porównania. Autorzy podsumowali, że prezentowane termoelementy są odpowiednie do pomiaru chwilowych charakterystyk temperatury i strumienia ciepła we wszystkich fazach układu napędowego silnika raketowego.

Analiza aerotermiczna dla eksperymentalnego lotu rakiety ROTEX-T opisali Thiele, Gülhan i Olivier [2018]. Autorzy uzyskali dane eksperymentalne wykonując pomiary specjalnie zaprojektowanymi termoelementami koncentrycznymi typu E (przeznaczonymi w szczególności do pomiarów w krótkim okresie czasu) oraz termoelementami typu K. Dane eksperymentalne pochodziły ze stożka oraz flary. Autorzy zmierzili strumienie ciepła przy użyciu mikroczujników, które porównali do wyników otrzymanych w oparciu o klasyczny jednowymiarowy model przewodzenia ciepła z pomiarów temperatury w odpowiadających miejscach.

Zastosowanie pomiarów temperatury do rozwiązania zagadnienia odwrotnego opisali Kumar i Mahulikar [2016] w artykule dotyczącym rekonstrukcji nagrzewania aerotermicznego materiału rakiety nośnej wielokrotnego użytku (Reusable Launch Ve-

hicle). Poruszyli wpływ rozmieszczenia termoelementów i błędów pomiaru na stabilność rozwiązania. Zauważyli, że zbyt duża głębokość umieszczenia termoelementu powodowała bardziej stłumione odpowiedzi temperaturowe i wpłynęła negatywnie na stabilność metody odwrotnej i dokładność oszacowania nagrzewania powierzchni. Autorzy otrzymali dokładniejsze wyniki gdy termoelement znajdował się bliżej powierzchni grzewczej.

Nową metodę odwrotną do wyznaczania zmiennych w czasie strumieni ciepła i temperatur opisali Al-Hadithi i Karamalla [2022]. Kulki termoelementów typu K były przylutowane do otworów nawierconych w powierzchni miedzianego pręta, tworząc miernik przepływu ciepła. Mierniki były zamontowane wewnątrz ściany dyszy silnika raketowego w trzech różnych odległościach od strony gazowej. Obliczona stała czasowa dla termoelementu wynosiła 0,00145 s. Otrzymane dane temperaturowe były aproksymowane wielomianami trzeciego stopnia. Autorzy stwierdzili, że zaproponowana metoda umożliwi oszacowanie temperatury powierzchni i strumienia ciepła w środowisku o wysokim ciśnieniu (około 82,97 bara).

Podobną analizę przedstawili Wang et al. [2018]. Dotyczyła ona wyznaczenia zmiennego w czasie strumienia ciepła na wewnętrznej stronie ściany komory spalania silnika raketowego na paliwo ciekłe. Pomiar temperatury (z dokładnością $\pm 0,4\%$) wykonano pojedynczym termoelementem współosiowym typu K umieszczonym wewnątrz ściany. Dane z eksperymentu przed zastosowaniem w metodzie odwrotnej zostały wygładzone metodą Butterwortha w celu tłumienia szumów wynikających z zakłóceń. Autorzy stwierdzili, że wyniki obliczeń strumienia ciepła otrzymane z pomiaru pojedynczym termoelementem były mniejsze o mniej niż 5% od pomiaru podwójnego i ta metoda może być stosowana gdy nie ma możliwości wykonania pomiaru w dwóch miejscach.

Vicentin et al. 2019 opisali metodę odwrotną oraz zaproponowali nową metodę obliczania strumienia ciepła na podstawie danych z eksperymentu. Celem badania było wyznaczenie teoretyczne i zmierzenie przepływu ciepła w silniku raketowym na paliwo stałe. Temperatura była zmierzona na zewnętrznej ścianie silnika przy użyciu termoelementu typu K o czasie reakcji $< 0,3$ s. Eksperyment był przeprowadzony dla trzech silników. W badaniu tym został również przeanalizowany wpływ częstotliwości akwizycji danych, który jednak nie wpłynął znacząco na wyniki. Dane temperaturowe z dodatkowym losowym błędem posłużyły autorom do wyznaczenia rozwiązania zagadnienia odwrotnego. Autorzy stwierdzili po porównaniu zaproponowanej metody do dwóch innych, że pozwala uniknąć konieczności obliczania właściwości fizycznych gazów powstających w wyniku spalania, nie jest bardzo wrażliwa na błędy eksperymentalne i daje podobne wyniki do metody odwrotnej.

Symulacje numeryczne w celu zbadania wpływu oporu kontaktowego pomiędzy termoelementem i powierzchnią o niskiej przewodności cieplnej na dokładność pomiaru temperatury przedstawili Fefelov i Chuvilin [2024]. Termoelementy były w tym badaniu umieszczone na zewnątrz płytki. Jako model termoelementu autorzy zastosowali kulki o różnych średnicach. Porównali rozkłady temperatury na płytce z umiesz-

czonym termoelementem oraz w modelu przypadku idealnego bez termoelementu. Zaobserwowali, że błąd był mniejszy przy większej powierzchni styku i najmniejszy po wprowadzeniu pasty termoprzewodzącej do strefy styku oraz zmniejszanie się błędu wraz ze wzrostem przewodności cieplnej materiału bazowego.

Metodę korekty przewodnictwa i bezwładności w pomiarach w stanach przejściowych w płynie przy pomocy termoelementu opisali Seibold et al. [2022]. Autorzy zaznaczyli, że metody korekty zmierzonej temperatury są konieczne w przypadkach, gdy błąd nie jest pomijalny. Autorzy zaproponowali model korekty oparty na bilansie energetycznym, dla określonych warunków brzegowych i rozwiązali go analitycznie, natomiast bardziej złożone przypadki przeanalizowali numerycznie (MATLAB). Model został zweryfikowany na podstawie eksperymentu numerycznego, w którym termoelement był zamodelowany jako walec z jednorodnego materiału o stałych właściwościach (ciepło właściwe, gęstość i przewodność cieplna). Na podstawie temperatury z termoelementu autorzy obliczyli temperaturę płynu.

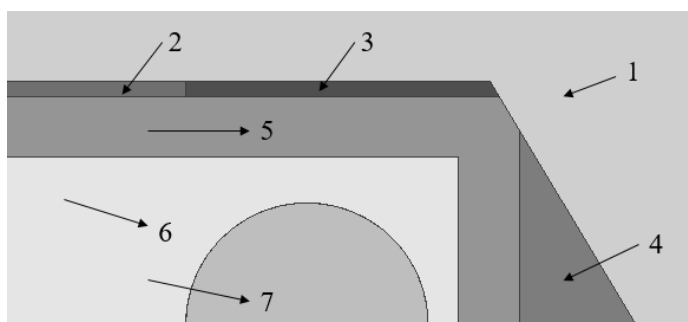
Weryfikację eksperymentalną przedstawionego modelu korekty [Seibold et al. 2022] przeprowadzili Krille et al. [2022]. Eksperyment został przeprowadzony dla różnych termoelementów (typ K i T równocześnie) w zależności od głębokości zainstalowania i wzrostu temperatury oraz częstotliwości akwizycji danych 10 Hz. Dwa termoelementy zostały zainstalowane w kanale o szerokości 13 mm w płynie (powietrze) na większej i mniejszej głębokości. Pomiary termoelementem na mniejszej głębokości były obciążone błędem wynikającym z przewodzenia wzdłuż termoelementu, natomiast oba były obciążone błędami wynikającymi z bezwładności pojemnościowej. Termoelement na większej głębokości służył do porównania temperatury, jako ten, który podaje prawdziwą temperaturę płynu. Autorzy stwierdzili, że płytko umieszczone termoelementy typu T wykazywały większe błędy pomiaru niż typu K i było to spowodowane większym współczynnikiem przewodzenia ciepła dla miedzi. Eksperyment był powtarzalny gdy konfiguracja nie ulegała zmianie. Autorzy przedstawili uproszczoną metodę, gdy nie jest możliwe zainstalowanie dwóch termoelementów.

3. PROJEKT NUMERYCZNY

3.1. Geometria

Analizowanym zagadnieniem był rozkład temperatury w czasie wewnątrz walca z umieszczonym w osi termoelementem. Badano wałek o średnicy 20 mm i długości 40 mm. Średnica termoelementu wynosiła 1,5 mm. Głębokość nawierconego otworu wynosiła 22 mm. Dla uproszczenia przyjęto, że przypadek jest osiowoosymetryczny i możliwe jest przeanalizowanie połowy walca w 2D. Ponadto założono, że po umieszczeniu termoelementu w otworze, w wyniku docisku do dna otworu powstanie pewna niewielka powierzchnia styku.

Geometria została zaprojektowana przy pomocy programu Autodesk Inventor Professional 2026. Wszystkie elementy zostały oznaczone na Rys. 1. Model uwzględniał wałek (1) z otworem w osi, otwór oraz uproszczony model termoelementu. Otwór został podzielony na trzy części, aby umożliwić zmianę analizowanych materiałów w tych przestrzeniach. Części otworu to: część boczna górna otworu (2), część boczna dolna otworu (3) w niewielkiej odległości od końcówki pomiarowej termoelementu oraz część dolna (4) w stożku powstałym w wyniku nawiercenia walca. Model termoelementu składał się z następujących elementów: płaszcz termoelementu (5), izolacja (6) oraz spoina pomiarowa (7). Uproszczenie polegało na pominięciu w modelu występujących w rzeczywistości wewnątrz termoelementu przewodów i umożliwiło wykonanie osiowosymetrycznego dwuwymiarowego modelu.



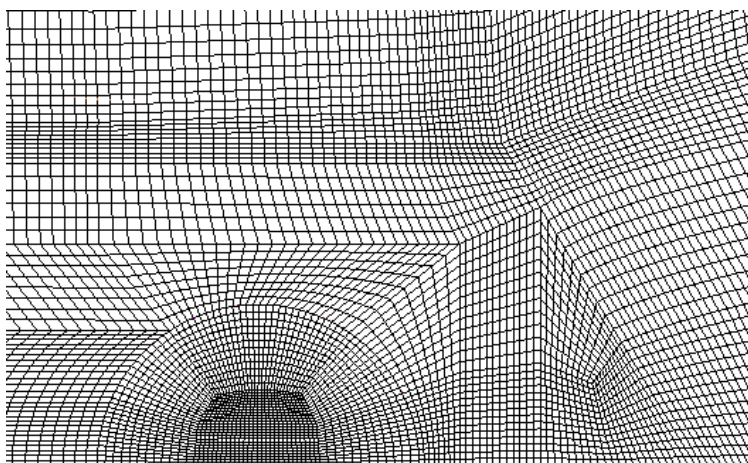
Rys. 1. Powiększony widok części modelu

3.2. Siatka obliczeniowa

Siatka obliczeniowa została wykonana w programie Ansys ICEM CFD. Zastosowano rodzaj siatki strukturalnej o elementach czworobocznych. W okolicach styku części geometrii, w których spodziewano się zmiany materiału a także w spoinie pomiarowej zastosowano zagęszczenia siatki. Zagęszczenie siatki wałka wynikało również z konieczności dopasowania wielkości elementów do sąsiadujących elementów otworu. Ponad 100-krotna różnica wielkości między wałkiem i otworem oraz konieczność zastosowania w otworze przynajmniej kilku elementów wpłynęła na znaczący wzrost liczby elementów siatki przypadających na wałek. Poniżej na Rys. 2 przedstawiono zagęszczenie siatki obliczeniowej w okolicy styku termoelementu z wałeczkiem. Podstawowe informacje dotyczące jakości siatki zestawiono w Tab. 1. Wartości jakości ortogonalnej oraz skośności Erikssona mogą przyjmować wartości od 0 – najgorsza do 1 – najlepsza jakość.

3.3. Warunki brzegowe

Na podstawie wstępnych badań eksperymentalnych nagrzewania wałka stalowego o średnicy 20 mm wyznaczono przebieg temperatury gazu oraz współczynnika przejmowania ciepła na jego powierzchni. Warunek brzegowy trzeciego rodzaju został wyznaczony za pomocą metody M1 przedstawionej w pracy Joachimiak, Joachimiak, Frąckowiak [2024]. Przebieg współczynnika przejmowania ciepła i temperatury otaczającego wałek powietrza został przedstawiony na Rys. 3.

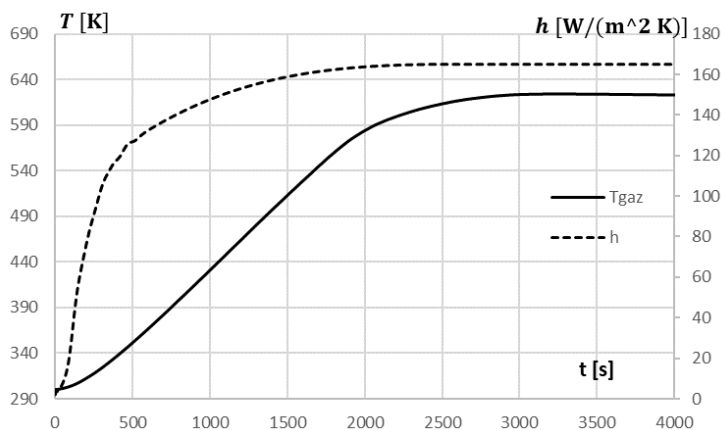


Rys. 2. Zagęszczenie siatki obliczeniowej w miejscu styku

Tabela 1

Parametry siatki

Parametr	Wartość	Jednostka
Liczba elementów	63 909	szt.
Minimalna jakość ortogonalna	$\approx 0,525$	-
Minimalna skośność Erikssona	0,531	-



Rys. 3. Przebieg temperatury gazu i współczynnik przyjmowania ciepła

3.4. Wyniki obliczeń

W ramach analizy przeprowadzono dwie symulacje numeryczne. Pierwsza symulacja odwzorowywała model rzeczywisty dla przedstawionej geometrii wałka z zamodelowanym termoelementem. W tym przypadku zostały przyjęte następujące materiały: wałeczek (stal 1008), płaszcz termoelementu (Inconel), izolacja (MgO), spoina pomiarowa (stal 1008) oraz wszystkie części otworu (powietrze). Druga symulacja odwzorowywała model idealny, w której wałek wykonany był bez nawiercenia. Siatka w przypadku idealnym również zawierała osobną część przeznaczoną na spoinę aby umożliwić porównanie wyników temperatury w tym samym miejscu. W tym przypadku całość miała właściwości stali 1008.

Przeanalizowano zmianę obliczonej temperatury spoiny pomiarowej w czasie dla tych dwóch przypadków. Zdefiniowano różnicę temperatury ΔT następująco:

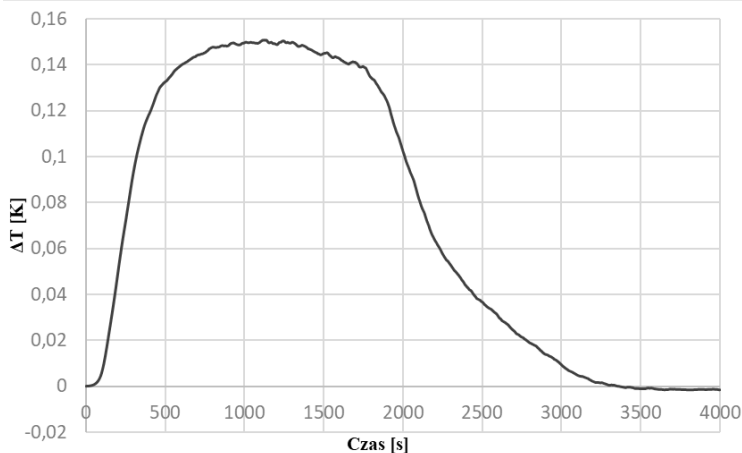
$$\Delta T = T_{id} - T_{rz} \quad (1)$$

gdzie:

T_{id} – temperatura w danej chwili w przypadku idealnym, w miejscu, w którym w przypadku rzeczywistym występowała spoina pomiarowa [K],

T_{rz} – temperatura spoiny pomiarowej w danej chwili w przypadku rzeczywistym [K].

W początkowej fazie podczas nagrzewania zaobserwowano gwałtowny wzrost ΔT , która przyjmowała maksymalnie około 0,15 K i utrzymywała się w przybliżeniu stała do momentu całkowitego nagrzania (rys. 4). Następnie zaobserwowano spadek ΔT do utrzymującej się wartości około 0,016 K wynikającej z panującej w tym okresie czasu w całym układzie docelowej temperatury. Charakter ΔT został przedstawiony na Rys. 4.



Rys. 4. Rozkład różnicy temperatury w spoinie pomiarowej dla przypadku idealnego i rzeczywistego

4. PODSUMOWANIE

W celu precyzyjnego odwzorowania zjawisk przepływu ciepła występujących pomiędzy badanym materiałem a spoiną pomiarową termoelementu należy dokładnie odtworzyć geometrię termoelementu: wielkość spoiny, materiał izolujący spoinę od płaszczka, kształt końcowej powierzchni płaszczka termoelementu oraz geometrię otworu gdzie istotny jest kąt stożka nawiercenia. Trzeba wziąć pod uwagę właściwości cieplne: spoiny, materiału izolującego, materiału płaszczka. Średnica otworu jest wykonywana z pewnym naddatkiem w stosunku do średnicy płaszczka termoelementu. To powoduje występowanie pustej przestrzeni pomiędzy powierzchnią boczną i końcową płaszczka termoelementu a powierzchnią otworu. W przestrzeni tej zwykle znajduje się powietrze które może powodować znaczący opór cieplny. W celu zredukowania oporu stykowego można zastosować pastę termoprzewodzącą.

Do wyznaczenia wpływu oporów kontaktowych i bezwładności cieplnej termoelementów planowane jest wykonanie badań dla dynamicznego procesu chłodzenia geometrii walcowych. Przewiduje się wykorzystanie wałków o średnicach od 10 do 40 mm oraz termoelementów płaszczkowych typu T i K o średnicach 1 i 1,5 mm.

Warunki brzegowe będą wyznaczone z rozwiązania zagadnienia odwrotnego na podstawie pomiaru temperatury możliwie blisko powierzchni bocznej badanych geometrii. W zależności od uzyskanej stabilności wyników w symulacjach będą uwzględniane warunki brzegowe przepływu ciepła I, II lub III-go rodzaju.

LITERATURA**Pozycje książkowe**

1. Woodbury K. A., Najafi H., de Monte F., Beck J. V., 2023, *Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems*, John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.

Artykuły w czasopismach

1. Al-Hadithi M. B., Karamalla A. A., 2022, Experimental Investigations of Heat-Flux and Temperature Predictions by New Inverse Technique, *WSEAS Transactions on Environment and Development*, tom 18, s. 1304 – 1311.
2. Chen S., Chen L., Fu J., Li Y., 2023, Reconstruction of the heat flux input of coated gun barrel with the interfacial thermal resistance, *Case Studies in Thermal Engineering*, tom 49, nr 103242.
3. Fefelov A.A., Chuvilin A.N., 2024, Studying the Effect of a Thermocouple Contact with the Surface of a Thin Sample with Low Thermal Conductivity on the Accuracy of Temperature Determination, *Technical Physics Letters*, tom 50, nr 1, s. 58 – 62.
4. Genix M., Vairac P., Cretin B., 2009, Local temperature surface measurement with intrinsic thermocouple, *International Journal of Thermal Sciences*, tom 48, nr 9, s. 1679 – 1682.
5. Joachimiak D., Joachimiak M., Frąckowiak A., 2024, Determination of boundary conditions from the solution of the inverse heat conduction problem in the gas nitriding process, *Energy*, tom 300, nr 131497.
6. Kou Z., Wu R., Wang Q., Li B., Li C., Yin X., 2024, Heat transfer error analysis of high-temperature wall temperature measurement using thermocouple, *Case Studies in Thermal Engineering*, tom 59, nr 104518.
7. Kumar S., Mahulikar S. P., 2016, Reconstruction of aero-thermal heating and thermal protection material response of a Reusable Launch Vehicle using inverse method, *Applied Thermal Engineering*, tom 103, s. 344 – 355.
8. Luo B., Cao L., Zhang J., Luo F., Zhou H., Ma K., Beltrán-Pitarch B., Solis-De la Fuente M., Falomir F. V., García-Cañadas J., 2022, Defect governed zinc-rich columnar AZO thin film and contact interface for enhanced performance of thermocouples, *Physical Chemistry Chemical Physics*, tom 24, nr 11, s. 6905 – 6914.
9. Palma i Spolaore [2021] Palma M. D., Spolaore M., 2021, Modelling Fast Response Surface Thermocouple for Plasma Facing Components, *IEEE Sensors Journal*, tom 21, nr 16, s. 17898 – 17905.
10. Sun, Chen i Chen [2013] Sun Z. Q., Chen Y., Chen X., 2013, Measurement of transient surface temperature of conductive solid using thermocouples with different junctions, *Sensors and Transducers*, tom 148, nr 1, s. 22 – 27.
11. Vicentin I. C. F. d. S., Marchi C. H., Foltran A. C., Moro D., Silva N. D. P., Campos M. C., Araki L. K., Diógenes A., 2019, Theoretical and experimental heat transfer in solid propellant rocket engine, *Journal of Aerospace Technology and Management*, tom 11, nr e3819.
12. Wang T., Sun B., Xiang J., Liu D., 2018, Wall heat flux measurements in a GO2/GH2 heat-sink combustion chamber, *Journal of Thermal Science and Technology*, tom 13, nr 1.

13. Zhang Q., Ma H., Guo J., Li Z., Xiao A., Liu Y., 2024, Analysis of cooling effects and measurement errors in water-cooled thermocouples for total temperature measurement in aviation engine combustion chambers, *International Journal of Thermal Sciences*, tom 205, nr 109290.
14. Zieliński M., Koniorczyk P., Surma Z., Zmywaczyk J., Preiskorn M., 2022, Numerical Study of Heat Transfer in a Gun Barrel Made of Selected Steels, *Energies*, tom 15, nr 5, nr 1868.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Koo J. H., Natali M., Lisco B., Yao E., Schellhase K., 2018, In situ ablation recession and thermal sensor for thermal protection systems, w materiały *Journal of Spacecraft and Rockets*, tom 55, nr 4, s. 783 – 796.
2. Krille T., Poser R., Diel M., von Wolfersdorf J., 2022, Conduction and Inertia Correction for Transient Thermocouple Measurements. Part II: Experimental Validation and Application, w materiały *E3S Web of Conferences*, tom 345.
3. Nanigian J., Nanigian D., 2006, A unique thermocouple to measure the temperatures of squibs, igniters, propellants and rocket nozzles w materiały *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, tom 6222.
4. Seibold F., Schwab A., Dubois V., Poser R., Weigand B., von Wolfersdorf J., 2022, Conduction and Inertia Correction for Transient Thermocouple Measurements. Part I: Analytical and Numerical Modelling, w materiały *E3S Web of Conferences*, tom 345.
5. Thiele T., Gülhan A., Olivier H., 2018, Instrumentation and aerothermal postflight analysis of the rocket technology flight experiment ROTEX-T, w materiały *Journal of Spacecraft and Rockets*, tom 55, nr 5, s. 1050 – 1073.

TEMPERATURE MEASUREMENT IN SOLIDS – TEMPERATURE ANALYSIS AND CALCULATION EXAMPLE

Abstract

This article reviews the literature on temperature measurement accuracy. Particular attention is paid to measurement conditions such as geometry, measurement method, measurement medium, thermal load on measuring elements, possible methods for correcting measurement errors, numerical calculations, and experiment. The primary focus is on temperature measurement in solids using a sheathed thermocouple with an insulated junction. Factors influencing measurement error are analyzed. This work includes preliminary experimental studies of the heating of cylindrical geometry. Based on measurement data, heat flow boundary conditions were determined using an inverse problem, which served as input for numerical simulations. Two geometry variants were simulated. In the first, a drilled hole with a thermocouple and its internal structure was recreated. The second variant was a solid cylinder. The difference in junction temperature between these two cases was then determined.

Keywords: temperature measurement; thermocouple, measurement errors, numerical simulation