

Humanoidalne roboty podwodne ESA-HAUV w obsłudze technicznej budowli hydrotechnicznych

Humanoid underwater robots ESA-HAUV in the technical maintenance of hydraulic structures

Witold Paleczek^{1*} 

¹ Wydział Budownictwa, Politechnika Częstochowska

* Kontakt / Correspondence: witold.paleczek@pcz.pl

Streszczenie:

Koncepcja humanoidalnych robotów podwodnych ESA-HAUV zakłada autonomiczne, długotrwale działające jednostki zdolne do obsługi technicznej budowli hydrotechnicznych w warunkach odcięcia od nadzoru człowieka. Systemy te łączą manipulację humanoida z hydrodynamiczną mobilnością oraz mechanizmy samokonserwacji, wzajemnej samonaprawy i pomocy, a także wytwarzanie narzędzi na wielomateriałowych drukarkach 3D. Ich energetyczna samowystarczalność umożliwia realizację zadań inspekcyjnych, serwisowych i interwencyjnych w środowisku wysokiego ryzyka przy sterowaniu zapewnianym przez AI.

Słowa kluczowe: robotyka podwodna, robot ESA-HAUV, fraktale Barnsleya, robot autonomiczny, robot humanoidalny

Abstract:

The concept of humanoid underwater robots ESA-HAUV assumes autonomous, long-operating units capable of performing technical maintenance of hydraulic structures in conditions where human supervision is unavailable. These systems combine humanoid manipulation with hydrodynamic mobility and incorporate mechanisms of self-maintenance, mutual self-repair and assistance, as well as the fabrication of tools using multimaterial 3D printers. Their energetic self-sufficiency enables inspection, servicing and intervention tasks in high-risk underwater environments under AI-based control.

Keywords: underwater robotics, ESA-HAUV robot, Barnsley fractals, autonomous robot, humanoid robot, 3D printing in robotics

1. Wstęp

Robotyka podwodna od wielu lat rozwija się w trzech głównych kierunkach: ROV (Remotely Operated Vehicle) – pojazdów zdalnie sterowanych, AUV (Autonomous Underwater Vehicle) – autonomicznych pojazdów podwodnych oraz HAUV – (Hovering Autonomus Underwater Vehicle / Hybrid Aerial Underwater Vehicle): jednostek poruszających się pod wodą oraz robotów latająco-pływających przy czym autonomia polega na tym, że robot sam planuje trasę wokół przeszkody, bez potrzeby ciągłego sterowania przez operatora, natomiast w odmianie hybrydowej: robot potrafi wystartować z lądu, lecieć nad wodę, zanurkować na głębokość nawet kilkudziesięciu metrów, a następnie wynurzyć się i ponownie odlecieć. W obiektach hydrotechnicznych techniki sanitarnej – takich jak komory ujęć wody, syfony, zbiorniki reten-

cyjne czy tunele – potrzebne są systemy: zdolne do precyzyjnej pracy w ograniczonej przestrzeni, autonomiczne energetycznie, zdolne do inspekcji i samoserwisowania, odporne na awarie, zwłaszcza współpracujące w grupie.

Wymagania te skłaniają do wyodrębnienia nowej klasy robotów: ESA-HAUV (Energy-Self-Sufficient Humanoid Autonomous Underwater Vehicle), czyli energetycznie samowystarczalnych humanoidalnych autonomicznych robotów podwodnych. Skalowalna architektura ESA-HAUV umożliwia ich zastosowanie również w infrastrukturze wodno-sanitarnej: w oczyszczalniach ścieków i kolektorach, gdzie napęd płetwowy zapewnia mobilność w środowisku silnie zanieczyszczonym, mulistym, porośniętym roślinnością i obciążonym biofilmem, w którym napędy śrubowe i wirniki odrzutowe ulegają zapychaniu, erozji oraz zakłóceniom pracy. W takich warunkach układy płetwowe

uzyskują wyraźną przewagę eksploatacyjną oraz funkcjonalną redundancję. Potrzeba takich systemów wynika z rosnącej złożoności i utrudnionego dostępu do obiektów hydrotechnicznych, które wymagają kosztownych i ryzykownych wejść personelu, oraz z konieczności ograniczenia zagrożeń dla ludzi.

2. Przegląd literatury przedmiotu

We wszelkich zastosowaniach maszyn konieczne jest zapewnienie skutecznych metod pozyskiwania energii elektrycznej do ich zasilania. Badania nad autonomicznymi systemami energetycznymi, materiałami funkcjonalnymi oraz technologiami pozyskiwania energii dla robotów podwodnych koncentrują się wokół następujących kluczowych obszarów: PV (Photovoltaics) – klasyczna fotowoltaika konwertująca światło na energię elektryczną, stosowana głównie w warunkach płytkowodnych lub przy oświetleniu sztucznym; PPV (Perovskite PV) – fotowoltaika perowskitowa o wysokiej sprawności przy słabym świetle i niskiej masie modułów; WPT (Wireless Power Transfer) – bezprzewodowy przesył energii metodami magnetycznymi, radiowymi lub optycznymi, umożliwiający ładowanie bez kontaktu; HYD (Hydrokinetics) – pozyskiwanie energii z ruchu wody, prądów, falowania i turbulencji; TENG (Triboelectric Nanogenerators) – generatory wykorzystujące tarcie i kontakt materiałów do produkcji energii z przepływów i drgań; PE (Piezoelectric Generators) – konwersja odkształceń mechanicznych na energię elektryczną, szczególnie efektywna przy drganiach i pracy napędu płetwowego; IND (Electromagnetic Induction) – wytwarzanie energii w zmiennych polach magnetycznych, także w układach wirujących; MS (Magnetostriction) – generacja energii dzięki cyklicznym odkształceniom materiałów ferromagnetycznych w polu magnetycznym; PMAG (Piezomagnetism) – powstawanie polaryzacji magnetycznej pod wpływem naprężeń, umożliwiające konwersję energii w środowiskach o zmiennym ciśnieniu; TE (Thermoelectrics-Seebeck) – pozyskiwanie energii z naturalnych gradientów temperatury w wodzie; SSE (Spin Seebeck Effect) – generacja sygnału elektrycznego w ferromagnetykach pod wpływem gradientu temperatury; GAL (Galvanic Cells) – klasyczne ogniwa galwaniczne oparte na reakcjach elektrochemicznych; MFC (Microbial Fuel Cells) – bioogniwa mikrobiologiczne wykorzystujące metabolizm bakterii w wodach bogatych w materię organiczną; EK (Electrokinetics-Zeta) – energia z przepływu w mikrokanałach, powstająca wskutek przesuwania jonów przy ścianach kanału, zależna od pH, jonowości, materiału, temperatury i rodzaju cieczy; IBV (Isotopic Betavoltaics) – długowieczne źródła energii elektrycznej oparte na konwersji promieniowania beta w półprzewodniku. Obszary te stanowią podstawę projektowania systemów zdolnych do długotrwałej pracy w środowisku wodnym, szczególnie w zadaniach inspekcyjnych i serwisowych infrastruktury hydrotechnicznej oraz obiektów techniki sanitarnej. Coraz większe znaczenie zyskuje hydrodynamika napędów inspirowanych biologią: w pracy z 2026 r. [24] przedstawiono analizę zależności między geometrią płetwy, charakterystyką przepływu a efektywnością napędu w pływających robotach humanoidalnych pracujących w warunkach typowych dla obiektów hydrotechnicznych: napęd płetwowy wykazuje przewagę nad klasycznymi napędami mechanicznymi, zwłaszcza w środowiskach mulistych, zanieczyszczonych lub porośniętych roślinno-

ścią, gdzie śruby i wirniki szybko ulegają zapychaniu lub uszkodzeniom. Poniżej przedstawiono syntetyczny przegląd prac istotnych dla projektowania autonomicznych humanoidalnych robotów pływających ESA-HAUV, z uwzględnieniem wymagań energetycznych, materiałowych, hydrodynamicznych i środowiskowych istotnych dla budowli hydrotechnicznych.

Fotowoltaika i konwersja światła. Perowskitowe ogniwa słoneczne o strukturze ABX_3 (A – jon stabilizujący strukturę, B – jon metalu, X – anion halogenkowy) charakteryzują się wysoką sprawnością, niską masą i zdolnością pracy przy słabym oświetleniu; Correa-Baena (2017) [10] omawia stabilność perowskitów, Sadoqi (2026) [25] modeluje ich wydajność metodami ML (machine learning – uczenie maszynowe), a Cheng (2026) [9] analizuje warstwy transportu ładunku. Kayes (2011) [18] przedstawia rekordowe sprawności, a Aransiola (2026) [3] opisuje przejście do modułów użytkowych. Technologie te umożliwiają pozyskiwanie energii z oświetlenia sztucznego w obiektach hydrotechnicznych.

Piezoelektryka i odzysk energii z ruchu. Piezoelektryki to materiały, które podczas ugięcia, ściskania lub drgań generują krótki impuls elektryczny, dzięki czemu mogą odzyskiwać energię z ruchu konstrukcji; Wang & Song (2006) [36] wykazali, że nawet nanostruktury ZnO mogą pełnić rolę mikrogeneratorów, a Dagdeviren (2014) [11] potwierdza możliwość konwersji powtarzalnych drgań na użyteczny prąd. W ESA-HAUV piezoelektryki pozyskują energię z oscylacji płetw, drgań hydrodynamicznych i mikroruchów kadłuba, generując impulsy elektryczne gromadzone w układach zasilania pokładowego.

Triboelektryka i kontakt z wodą. Triboelektryka to zjawisko powstawania ładunków podczas kontaktu i rozdzielania powierzchni w układach „stałe-stałe” oraz „stałe-ciecz”; w środowisku wodnym decydują procesy powierzchniowe, takie jak odrywanie filmu wodnego, zmiany napięcia powierzchniowego i transfer ładunku na granicy faz. Wang (2013) [35] wykazał, że tribogeneratory mogą być lekkimi i czułymi źródłami energii. Tirpude (2026) [33] wykorzystał łuski ryb jako naturalny materiał triboelektryczny, generujący ładunek podczas zanurzenia i wynurzania. Mao (2026) [23], Hossain (2026) [17], Dey (2026) [13] i Tariq (2026) [31] opracowali wydajne nanokompozyty do pracy w wilgoci, a Fan (2012) [15] zaprezentował elastyczne tribogeneratory pozyskujące energię z ruchu, drgań i odrywania filmu wodnego na powierzchni robotów.

Termoelektryki i gradienty temperatur. Termoelektryki generują napięcie, gdy wzdłuż ich struktury występuje gradient temperatury, który wymusza rozdział ładunku w materiale. Podstawy działania opisali Snyder & Toberer (2008) [29] oraz Bell (2008) [5], a nowsze prace Liu (2024) [21] i Gong (2024) [16] przedstawiają materiały wysokosprawne, m.in. CNT (carbon nanotubes – węglowe nanorurki) i SnSe (selenek cyny), działające efektywnie nawet przy niewielkich gradientach. W ESA-HAUV termoelektryki wykorzystują naturalną różnicę temperatur między chłodną wodą a cieplejszą elektroniką, gdzie to właśnie gradient wzdłuż elementu termoelektrycznego umożliwia uporządkowany przepływ ładunku i generowanie energii elektrycznej.

Elektrochemia i magazynowanie energii. Elektrochemia opisuje przemianę energii chemicznej w elektryczną poprzez przepływ jonów między anodą i katodą w elektrolicie oraz elektronów w obwodzie zewnętrznym, co umożliwia kontrolowany transport ładunku i magazynowanie energii w ogniwach. Fun-

damenty współczesnej elektrochemii znajdujemy w pracach Bockris & Reddy (1970) [7] oraz Zhang (1996) [41], a nowsze prace Tavano (2026) [32], Subhanjaneyulu (2026) [30] i Deswal (2026) [12] opisują elektrody węglowe i tlenkowe o wysokiej stabilności cyklicznej, dużej powierzchni aktywnej i korzystnej wymianie jonowej. Materiały te umożliwiają wysokosprawne, kompaktowe magazynowanie energii.

Bioogniwa i systemy bioelektrochemiczne. Bioogniwa wytwarzają energię elektryczną dzięki temu, że mikroorganizmy lub enzymy rozkładają związki organiczne, uwalniając elektrony i jony. Elektrony trafiają na anodę, jony migrują przez elektrolit do katody, a różnica potencjałów między elektrodami generuje napięcie w obwodzie zewnętrznym. Jest to układ elektrochemiczny, w którym część biologiczna dostarcza substratów i inicjuje reakcje utleniania na anodzie, natomiast właściwa konwersja energii chemicznej w elektryczną zachodzi na elektrodach. Logan (2006) [22] opisał MFC – microbial fuel cells: bioogniwa mikrobiologiczne, Zebda (2013) [40] – bioogniwa glukozowe, a Efrati (2016) [14] – foto-bioelektrochemiczne konwersje energii. W systemach ESA-HAUV bioogniwa mogą wykorzystywać biofilm obecny w wodzie technicznej jako naturalne źródło związków organicznych i mikroorganizmów, umożliwiając długotrwałe, niskomocowe pozyskiwanie energii bez dodatkowych zasobów.

Hydrokinetyka i energia przepływu. Hydrokinetyka obejmuje techniki pozyskiwania energii z lokalnej prędkości przepływu wody, niezależnie od różnicy poziomów czy ciśnień, co odróżnia ją od klasycznej hydroenergetyki. Khan (2009) [19] i Bahaj (2011) [4] przedstawiają przegląd technologii konwersji energii przepływu, od turbin po rozwiązania mikroskalowe. W ESA-HAUV stosuje się mikrohydrokinetyczne generatory pracujące przy niskich prędkościach przepływu (0,05–0,3 m/s) i w ograniczonych przekrojach hydraulicznych, których zadaniem jest odzysk niewielkich ilości energii z lokalnych ruchów wody powstających podczas pracy robota. Przepływ wprawia w ruch miniaturowe wirniki, membrany lub elastyczne płetwy, a mikrogeneratory magnetyczne lub piezoelektryczne przetwarzają ten ruch na energię elektryczną (μW–mW), gromadzoną w układach buforowych i zasilającą sensory oraz moduły wybudzania. Istnieje teoretyczna możliwość zastosowania mikrogeneratorów ESA-HAUV jako pasywnego źródła energii w wybranych odcinkach kanałów, w których lokalne przepływy są stabilne, a poziom zanieczyszczeń nie powoduje trwałego zablokowania elementów roboczych.

Bezprzewodowy przesył energii (WPT) i betawoltaika izotopowa (IBV). Brown (1984) [8] i Shinohara (2014) [28] opisują podstawy WPT radiowego, Sample (2011) [26] rezonans magnetyczny, a Anyapo (2020) [2] i Yang (2026) [39] zastosowania podwodne. Zheng (2024) [42] omawia laserowy przesył energii. Agyekum (2025) [1] omawia technologie IBV (Isotopic Betavoltaics), wskazując, że betawoltaiczne źródła energii o gabarytach porównywalnych ze współczesnymi bateriami litowymi mogą generować stabilny prąd elektryczny przez dziesiątki lat, niezależnie od warunków środowiskowych (długowieczność energetyczna). WPT (Wireless Power Transfer) obejmuje metody indukcyjne, rezonansowe, radiowe i laserowe, które w odpowiednich warunkach środowiskowych mogą zapewniać bezkontaktowe ładowanie robotów ESA-HAUV na krótkich dystansach pod wodą.

3. Wprowadzenie do modelu komunikacji GNSS–akustyka w robotach ESA-HAUV

System sterowania ESA-HAUV w obrębie obiektów hydrotechnicznych wykorzystuje hybrydową komunikację GNSS–akustyka (GNSS: Global Navigation Satellite System – globalny system nawigacji satelitarnej), zapewniając wymianę danych między robotem a infrastrukturą nadwodną w warunkach ograniczonej widoczności i zmiennych parametrów środowiskowych. Boja GNSS pełni funkcję węzła synchronizacyjnego: odbiera sygnały satelitarne, generuje czas odniesienia i przekazuje pakiety sterujące do infrastruktury podwodnej; boja GNSS stanowi element infrastruktury hydrotechnicznej, pracujący na powierzchni wody i połączony ze stacją emiterów akustycznych; robot ESA-HAUV nie wypuszcza boi, lecz korzysta z jej sygnałów synchronizacyjnych i korekcyjnych. Stacjonarne emitery akustyczne przekształcają te pakiety w modulowane fale akustyczne dostosowane do propagacji w wodzie, umożliwiając komunikację w przestrzeniach zamkniętych, gdzie sygnały GNSS i łączność radiowa z zewnątrz są silnie tłumione. Robot, wyposażony w hydrofony i układ dekodowania, odbiera sygnały sterujące i synchronizacyjne, integrując je z warstwą decyzyjną. Dobór częstotliwości akustycznej zależy od geometrii obiektu, odległości propagacji oraz dopuszczalnych strat transmisyjnych. W kolejnym podrozdziale przedstawiono model uzasadniający wybór pasma roboczego, natomiast w tabelach 1 i 2 zestawiono źródła energii oraz współczesne technologie generowania prądu elektrycznego.

Tabela 1. Charakterystyka źródeł energii stosowanych w autonomicznych robotach podwodnych typu ESA-HAUV (opracowanie własne)
Table 1. Characteristics of energy sources used in ESA-HAUV autonomous underwater robots (own study)

Źródło energii	Typowa moc	Kiedy działa	Rola w ESA-HAUV	Opis
PV perowskitowe – Perovskite Photovoltaics	setki mW → waty	światło: sztuczne lub laserowe	główne źródło	Wysokosprawne, lekkie ogniwa przy słabym oświetleniu.
WPT (Wireless Power Transfer) – laserowe, indukcyjne, rezonansowe, radiowe, ultradźwiękowe, IR	waty → dziesiątki watów	dokowanie lub linia widzenia wiązki	szybkie ładowanie	Bezprzewodowy przesył energii: indukcyjny lub laserowy.
HKG (HydroKinetic Generation) – Hydrokinetyka	dziesiątki mW → waty	przepływ wody	uzupełniające	Energia z lokalnego przepływu (mikroturbiny, elastyczne elementy).
TENG (Triboelectric Nanogenerators) – Triboelektryki	μW → mW	ruch wody / tarcie	uzupełniające	Ładunek z kontaktu i rozdzielania powierzchni w wodzie.
PEG (PiezoElectric Generators) – Piezoelektryki	μW → mW	drgania / ruch robota	uzupełniające, pasywne	Energia z odkształceń i drgań konstrukcji.
MFC (Microbial Fuel Cells) – Bioogniwa	μW → mW	biofilm / związki organiczne	długotrwałe, niskomocowe	Energia z utleniania związków organicznych przez mikroorganizmy.
IBV (Isotopic Betavoltaics) – Izotopowe betawoltaiki	μW → mW (stabilne dekady)	ciągła emisja β	rezerwowe, ultradługowieczne	Stała energia z konwersji cząstek β w półprzewodniku.

Tabela 2. Zestawienie łączone 15 źródeł energii (moc–masa–sprawność–środowisko); opracowanie własne**Table 2.** Combined overview of 15 energy sources (power–mass–efficiency–operating environment); own study

Źródło	Moc typowa	Masa	Sprawność	Środowisko pracy
PV – Photovoltaics (fotowoltaika klasyczna)	mW – W	niska	10–25%	światło 450 nm, lasery
PPV – Perovskite PV (fotowoltaika perowskitowa)	mW – W	bardzo niska	15–30%	światło słabe, rozproszone
WPT – Wireless Power Transfer (beprzewodowy przesył energii)	W – 10-W	średnia	50–90%	dokowanie, linia „widzenia”
HYD – Hydrokinetics (hydrokinetyka)	mW – W	średnia	30–70%	przepływ wody, prądy
TENG – Triboelectric Nanogenerators (triboelektryki)	μW – mW	bardzo niska	5–30%	tarcie, ruch wody
PE – Piezoelectric Generators (generatory piezoelektryczne)	μW – mW	bardzo niska	10–40%	drżania, turbulencje
IND – Electromagnetic Induction (indukcja elektromagnetyczna)	μW – mW	niska–średnia	20–80%	ruch, drżania, zmienne pola magnetyczne jako warunek indukcji
MS – Magnetostriction (magnetostrykcja)	μW – mW	niska	5–20%	drżania, zmienne pola magnetyczne jako warunek powstania drgań magnetostrykcyjnych
PMAG – Piezomagnetism (piezomagnetyzm)	μW – mW	niska	5–15%	drżania, kompozyty magnetyczne
TE – Thermoelectrics (Seebeck) (termoelektryki)	μW – mW	niska	3–8%	gradienty temperatury wzdłuż materiału
SSE – Spin Seebeck Effect (efekt spinowoSeebecka)	nW – μW	bardzo niska	<1%	nanostruktury, gradienty termiczne
GAL – Galvanic Cells (ogniwa galwaniczne)	mW – W	średnia	80–95%	szeroki zakres środowisk
MFC – Microbial Fuel Cells (bioogniwa mikrobiologiczne)	μW – mW	średnia	10–60%	muł, osady, biofilmy
EK – Electrokinetics (Zeta) (elektrokinetyka – potencjał zeta)	μW – mW	bardzo niska	20–50%	przepływ wody, mikrokanaly
IBV – Isotopic Beta-voltaics (betawoltaika izotopowa)	μW – mW	niska	5–20%	wszędzie, 24/7, dekady

4. Pasma niskiej absorpcji promieniowania w wodzie

Woda, mimo swojej optycznej przezroczystości, jest jednym z najsilniejszych naturalnych absorberów energii elektromagnetycznej. W kontekście przesyłu energii do odbiorników stanowi to istotne ograniczenie: większość długości fal – od promieniowania rentgenowskiego po daleką podczerwień – jest w wodzie tłumiona o wiele rzędów wielkości silniej niż w powietrzu. Jedynie wąskie pasmowe obszary podwyższonej transmisji, takie jak pasmo niebiesko-zielone (~450 nm) oraz bliska podczerwień (~808 nm), umożliwiają efektywny przesył sygnału lub mocy w środowisku wodnym (do około 50 m w wodzie czy-

stej). Ta sama właściwość, która ogranicza technologie optyczne, pełni jednak kluczową funkcję ochronną: wysoka absorpcja H₂O sprawia, że woda skutecznie pochłania promieniowanie wysokoenergetyczne – kosmiczne, gamma i rentgenowskie – redukując jego intensywność już w pierwszych centymetrach głębokości. Dzięki temu woda stanowi naturalną barierę radiacyjną, od miliardów lat chroniąc biosferę przed destrukcyjną energią docierającą z przestrzeni kosmicznej. W środowisku wodnym większość metod bezprzewodowego przesyłu energii działa wyłącznie na bardzo krótkich dystansach, praktycznie kontaktowych. Indukcja magnetyczna i rezonans wymagają bliskiego sprzężenia cewek, które w wodzie zanika już po kilku centymetrach. Podobnie ultradźwiękowe WPT oraz promieniowanie IR (Infrared – podczerwień) i UV (Ultraviolet – nadfiolet) są tłumione o wiele rzędów wielkości silniej niż w powietrzu, co ogranicza ich zasięg do strefy „dotyku”. W praktyce jedynymi niekontaktowymi metodami pozostają trzy pasma transmisyjne w wodzie: pasmo niebiesko-zielone (~450 nm), bliska podczerwień (808 nm) oraz ekstremalnie długie fale radiowe (VLF/LF: VLF – Very Low Frequency: 3–30 kHz; LF – Low Frequency: 30–300 kHz). W celu uporządkowania i jednoznacznego przedstawienia różnic pomiędzy poszczególnymi klasami robotów podwodnych zastosowano trójstopniową strukturę porównawczą. Tabela 3 obejmuje cechy konstrukcyjne, określające fizyczną budowę i możliwości ruchowe robotów. Tabela 4 prezentuje cechy funkcjonalne, związane z energetyką, poziomem autonomii oraz zakresem zastosowań operacyjnych. Tabela 5 zestawia cechy systemowe, opisujące sposób realizacji misji, czas działania, interakcję z człowiekiem oraz poziom organizacji systemowej. Razem tworzą one spójny obraz ewolucji technologicznej – od klasycznych ROV po energetycznie samowystarczalne jednostki ESA-HAUV.

Tabela 3. Cechy konstrukcyjne robotów podwodnych danej klasy; opracowanie własne**Table 3.** Structural Characteristics of Underwater Robots by Class; own study

Klasa robota	Charakterystyka	Mobilność	Manipulacja
ROV	Zdalnie sterowany	Napęd śrubowy	Ramiona opcjonalnie / kamera
AUV	Autonomiczny	Napęd śrubowy, pędnik strumieniowy	Chwytnak / kamera
HAUV	Autonomiczny	Napęd hybrydowy; zasilanie: indukcyjne i PV	Manipulator / kamera
ESAHAUV	Samowystarczalny humanoidalny; praca zwłaszcza w grupie	Napęd pletnowy; zasilanie łączne: PV, WPT, HKG, TENG, PEG, MFC, IBV, MS, PMAG, TE, SSE, GAL, EK	Manipulatory humanoidalne: duża liczba stopni swobody; czujniki siły i momentu; precyzyjna kontrola chwytu; obsługa narzędzi podwodnych; autonomiczne procedury serwisowe AI

Tabela 4. Cechy funkcjonalne zależne od klasy robota podwodnego; opracowanie własne
Table 4. Functional Characteristics Dependent on the Class of Underwater Robot; own study

Klasa robota	Energetyka	Autonomia	Zastosowanie operacyjne
ROV	kabel	niska	inspekcje punktowe, prace pod nadzorem operatora
AUV	bateria	średnia	mapowanie, pomiary, misje liniowe bez manipulacji
HAUV	bateria + indukcja + PV	średnia	inspekcje, proste manipulacje
ESAHAUV	hybrydowy system: PV, WPT, HKG, TENG, PEG, MFC, IBV, MS, PMAG, TE, SSE, GAL, EK	bardzo wysoka	długotrwałe misje autonomiczne, naprawy, ratowanie innych robotów

Tabela 5. Cechy systemowe robotów podwodnych; opracowanie własne
Table 5. System-Level Characteristics of Underwater Robots; own study

Klasa robota	Tryb misji	Czas działania	Interakcja z człowiekiem	Poziom organizacji systemowej
ROV	Misje punktowe, w czasie rzeczywistym	Minuty–godziny	Wysoka – operator steruje	Brak organizacji systemowej
AUV	Misje liniowe, zaprogramowane	Godziny	Podstawowa – konfiguracja	Jednostka oprogramowana
HAUV	Misje zaprogramowane	Godziny	Wysoka – nadzór okresowy	Jednostka częściowo autonomiczna
ESA-HAUV	Misje długotrwałe, kolektywne	Dni–tygodnie	Minimalna – interwencja awaryjna	Kolektyw z zachowaniami emergentnymi: AI

5. Model matematyczny strat transmisyjnych i dobór pasma akustycznego dla systemu sterowania robotami typu ESA-HAUV

Sterowanie robotem systemu ESA-HAUV w obiektach hydrotechnicznych opiera się na dwóch komplementarnych kanałach komunikacyjnych:

Kanał satelitarny – boje GNSS. Boja GNSS jest powierzchniową, wyporną platformą pomiarową wyposażoną w odbiornik GNSS oraz moduł komunikacyjny, połączoną przewodem energetyczno-komunikacyjnym ze stacją emiterów akustycznych. Pełni

funkcję stacjonarnego punktu referencyjnego i nadrzędnego węzła synchronizacji, dostarczając sygnał czasu oraz korekcie GNSS do infrastruktury akustycznej. W konfiguracji minimalnej stosuje się dwie boje GNSS, co umożliwia wyznaczenie kierunku odniesienia i transformację lokalnego układu akustycznego do globalnego układu GNSS. Robot ESA-HAUV może posiadać odbiornik GNSS (rover), lecz sygnał satelitarny jest dostępny wyłącznie na powierzchni; pod wodą jedynym odniesieniem pozostaje układ boi GNSS oraz emiterzy akustyczne.

Kanał lokalny – infrastruktura akustyczna. Lokalna infrastruktura akustyczna obejmuje stacjonarne emiterzy akustyczne („podwodne głośniki”) rozmieszczone na ścianach i elementach konstrukcyjnych obiektu hydrotechnicznego. Emiterzy te pełnią funkcję podwodnych radiolatarni, zapewniając stabilną komunikację i pozycjonowanie w środowisku, w którym fale radiowe nie mogą być stosowane.

Aby zapewnić stabilną komunikację, konieczne jest określenie maksymalnej częstotliwości sygnału akustycznego, która może być stosowana przy danej odległości propagacji w podwodnych emiterach akustycznych. W tym celu wykorzystuje się uproszczony model strat transmisyjnych [42–44]:

$$TL(f, R) = 20 \log_{10} R + \alpha(f) R \tag{1}$$

gdzie:
R – odległość propagacji sygnału, m
f – częstotliwość sygnału, kHz
TL – strata transmisyjna (Transmission Loss), dB
 $\alpha(f)$ – współczynnik tłumienia absorpcyjnego, dB/m

W wodzie technicznej, dla częstotliwości rzędu kilku-kilkuset kHz, stosuje się liniową aproksymację:

$$\alpha(f) \approx kf \tag{2}$$

gdzie:
k – zależy od jakości wody (typowo $k = 0,001 \div 0,003 \text{ dB/m}\cdot\text{kHz}$)
Po podstawieniu otrzymujemy:

$$TL(f, R) = 20 \log_{10} R + kfR \tag{3}$$

Bilans energetyczny łączą akustycznego można oszacować następująco: przyjmujemy poziom nadawczy P_{tx} [dB re 1 μPa] oraz minimalny poziom odbioru P_{min} [dB re 1 μPa], gdzie notacja „re 1 μPa ” oznacza odniesienie do ciśnienia akustycznego 1 mikroPaskala – standardowej jednostki referencyjnej w akustyce podwodnej. Maksymalna dopuszczalna strata transmisyjna: $TL_{max} = P_{tx} - P_{min}$ natomiast warunek użyteczności pasma $TL(f, R) \leq TL_{max}$.

Jako przykład liczbowy dla odległości 30 m możemy przyjąć następujące założenia: $R = 30 \text{ m}$; $P_{tx} = 180 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$, $P_{min} = 120 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$, $TL_{max} = 60 \text{ dB}$, $k = 0,002 \text{ dB/m}\cdot\text{kHz}$. Wówczas: $20\log_{10} 30 = 29,54 \text{ dB}$, natomiast z warunku: $29,54 + 0,002\cdot f\cdot 30 \leq 60$ otrzymujemy $f_{max} \approx 508 \text{ kHz}$. Z kolei dla odległości 100 m otrzymujemy: $20\log_{10} 100 = 40 \text{ dB}$, przy warunku: $40 + 0,002\cdot f\cdot 100 \leq 60$ otrzymujemy $f_{max} \approx 100 \text{ kHz}$.

Z powyższych obliczeń można wyciągnąć następujące wnioski: przy trzykrotnym zwiększeniu odległości (z 30 m do 100 m) górna granica użytecznego pasma spada około pięciokrotnie.

6. Mechanizm powrotu robota przy braku zasięgu nawigacyjnego

Nawigacja inercyjna INS (Inertial Navigation System – system nawigacji inercyjnej) umożliwia robotowi autonomiczną pracę poza zasięgiem emiterów akustycznych, ponieważ nie wymaga sygnałów zewnętrznych, nie korzysta z GNSS i działa w pełnej ciszy elektromagnetycznej. INS opiera się wyłącznie na pomiarach akcelerometrów, żyroskopów oraz jednostki IMU (Inertial Measurement Unit – inercyjna jednostka pomiarowa). INS integruje przyspieszenia do prędkości, a prędkość do pozycji, co pozwala robotowi kontynuować misję nawet w całkowitym braku łączności. Z czasem pojawia się jednak narastający dryf błędów, który wymaga okresowej korekty.

Aby zapobiec utracie pozycji absolutnej, robot ESA-HAUV stosuje mechanizm autonomicznego powrotu do zasięgu nawigacyjnego, oparty na trzech zasadach:

Detekcja zaniku sygnału – robot monitoruje poziom odbieranych sygnałów akustycznych, analizując RSSI (Received Signal Strength Indicator – wskaźnik mocy sygnału odebranego) oraz SNR (Signal-to-Noise Ratio – stosunek sygnału do szumu). Gdy wartości te spadają poniżej progu operacyjnego, system przełącza się w tryb powrotu.

Powrót po trajektorii INS – robot wykorzystuje ostatnią poprawną pozycję akustyczną oraz wektor ruchu wyznaczony przez INS, aby obliczyć kierunek powrotu do obszaru, w którym sygnały były stabilne.

Reaktywizacja sygnału – po wejściu w strefę zasięgu robot automatycznie przeprowadza synchronizację z emiterami akustycznymi, koryguje dryf INS i wraca do trybu normalnej pracy. Mechanizm ten zapewnia, że robot nie oddali się na tyle, aby utracić możliwość rekonstrukcji pozycji absolutnej, a jednocześnie może bezpiecznie operować w obszarach o złożonej geometrii, gdzie sygnały akustyczne ulegają chwilowym zanikom. Aby ograniczyć narastający dryf INS, robot może wykorzystywać dopplerowski log prędkości (DVL, Doppler Velocity Log), który mierzy prędkość względem dna na podstawie przesunięcia dopplerowskiego odbitych sygnałów akustycznych. Integracja danych DVL z INS pozwala na bieżącą korektę trajektorii i stabilizację pozycji w warunkach braku łączności.

7. Wnioski

W środowisku wodnym istnieją tylko trzy pasma o niskiej absorpcji: niebiesko-zielone (~430–490 nm), bliska podczerwień (808 nm) oraz ekstremalnie długie fale radiowe VLF/LF. To one wyznaczają granice możliwej komunikacji i determinują architekturę systemów sterowania.

W praktyce hydrotechnicznej użyteczne pasma akustyczne obejmują: 5–30 kHz – komunikacja ogólna i sygnały sterujące z boi GNSS, 30–100 kHz – łączność średniego zasięgu z emiterami ściennymi, 100–500 kHz – krótkie dystanse: dokowanie, precyzyjne pozycjonowanie, linki serwisowe.

Model komunikacji ESA-HAUV łączy akustykę (kHz) z optycznymi oknami transmisyjnymi (450 nm, 808 nm), wykorzystując jedyne dostępne „wyspy niskiego tłumienia”. System dobiera częstotliwość adaptacyjnie – zależnie od geometrii obiektu, odległo-

ści, szumu tła i wymagań misji.

Boja GNSS pełni funkcję kanału nadrzędnego (synchronizacja, sterowanie), natomiast emiterzy akustyczne zapewniają lokalną komunikację o wysokiej przepływności.

Zakres kHz stanowi optymalne medium transmisyjne w wodzie: zapewnia kompromis między zasięgiem, tłumieniem i przepustowością. Fale 5–500 kHz propagują się stabilnie na dystansach od kilku do kilkuset metrów, podczas gdy pasmo 200–2000 Hz – mimo niskiego tłumienia – jest bezużyteczne z powodu hałasu/szumu, niskiej przepustowości i braku kierunkowości.

Dlatego system ESA-HAUV wykorzystuje pasma 5–500 kHz, które gwarantują stabilną komunikację, precyzyjne sterowanie i możliwość pracy w czasie rzeczywistym w złożonych obiektach hydrotechnicznych.

8. Podziękowania

Pracę tę dedykuję Mojemu Przyjacielowi – Ukochanej Jolancie, której troska, empatia i wrażliwość na piękno były dla mnie drogowskazem i spokojem serca, zwłaszcza w chwilach matematycznych emocji, gdy fraktale Barnsleya spletały się z algorytmami humanoidalnych robotów podwodnych, tworząc własną, nieoczywistą symfonię. Jej obecność – cicha, dobra i pełna światła – była jak delikatny motyw przewodni, który powraca, by nadać sens nawet najbardziej zawiłym równaniom. To dzięki temu motywowi nawet najbardziej złożone struktury mogą brzmieć harmonijnie, jeśli towarzyszy im dobro.

9. Literatura

- [1] Agyekum, E.B. (2025). Beta-Voltaic Nuclear Batteries – Review of Recent Developments, Challenges and Future Research Directions. *Journal of Energy Storage* 122 /2025: 116701. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116701>
- [2] Anyapo C., P. Intani. (2020). Wireless Power Transfer for Autonomous Underwater Vehicle, 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), Seoul, Korea (South), 2020, pp. 246-249, <https://doi.org/10.1109/WoW47795.2020.9291324>
- [3] Aransiola, A. O., Udofia, K. I., Amakom, C., Jubu, P. R., Nwokolo, I. K., Anyanwu, J. O., Ilori, O. O., & Oguzie, E. E. (2026). From record efficiency to commercially viable modules: A commercialization framework for stability-driven translation of perovskite solar cells. *Next Research.*, 10, 101856. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2026.101856>
- [4] Bahaj, A. S. (2011). Generating Electricity from the Oceans. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (7): 3399–3416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.032>
- [5] Bell, Lon E. (2008). Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems. *Science* 321, no. 5895/2008: 1457–1461. <https://doi.org/10.1126/science.1158899>
- [6] Bockris, John O'M., and Amulya K. N. Reddy. (1970). *Modern Electrochemistry*. Vol. 2: Electrochemistry in Transition. New York: Plenum Press, 1970.
- [7] Bockris, John O'M., and Amulya K. N. Reddy. (1970). *Modern Electrochemistry*. Vol. 1: An Introduction to an Interdisciplinary Area. New York: Plenum Press, 1970.
- [8] Brown W.C. (1984). The History of Power Transmission by Radio Waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and*

- Techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242, September 1984, <https://doi.org/10.1109/TMTT.1984.1132833>
- [9] Cheng, X., J. Li, Y. Li, and P. Niu. (2026). Development of Hole-Transport Layers in Inverted Perovskite Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 299: 114214. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2026.114214>
- [10] Correa-Baena, J.-P., M. Saliba, T. Buonassisi, M. Grätzel, A. Abate, W. Tress, and A. Hagfeldt. (2017). Promises and Challenges of Perovskite Solar Cells. *Science* 358 (6364): 739–744. <https://doi.org/10.1126/science.aam6323>
- [11] Dagdeviren, C., Yang, B. D., Su, Y., Tran, P. L., Joe, P., Anderson, E., Xia, J., Doraiswamy, V., Dehdashti, B., Feng, X., Lu, B., Poston, R., Khalpey, Z., Ghaffari, R., Huang, Y., Slepian, M. J., & Rogers, J. A. (2014). Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(5), 1927–1932. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317233111>
- [12] Deswal, I., Manyani, N., Kumar, A., & Tripathi, S. K. (2026). Tailoring the structure and electrochemical properties of CuO via Manganese doping for supercapacitor applications. *Ionics*, 32(7), 7033–7055. <https://doi.org/10.1007/s11581-026-07192-w>
- [13] Dey, P. K., & Bhattacharyya, A. R. (2026). High Performance Triboelectric Nanogenerators of Reduced Graphene Oxide-Based Poly(vinyl alcohol) Nanocomposites toward Bio-mechanical Energy Harvesting and an IoT System for Human–Machine Interface Application. *ACS Applied Electronic Materials*, 8(4), 1547–1563. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.5c01968>
- [14] Efrati, A., Lu, C., Michaeli, D., Nechushtai, R., Alsaoub, S., Schuhmann, W., & Willner, I. (2016). Assembly of photo-bioelectrochemical cells using photosystem I-functionalized electrodes. *Nature Energy*, 1(2). <https://doi.org/10.1038/nenergy.2015.21>
- [15] Fan, F., Tian, Z., & Wang, Z. L. (2012). Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 1(2), 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004>
- [16] Gong, Y., Dou, W., Lu, B., Zhang, X., Zhu, H., Ying, P., Zhang, Q., Liu, Y., Li, Y., Huang, X., Iqbal, M. F., Zhang, S., Li, D., Zhang, Y., Wu, H., & Tang, G. (2024). Divacancy and resonance level enables high thermoelectric performance in n-type SnSe polycrystals. *Nature Communications*, 15(1), 4231. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48635-0>
- [17] Hossain, M. A., Rahman, M. W., Padilla, V., & Uddin, M. J. (2026). A High-Performance triboelectric nanogenerator incorporating Solid-State synthesized ZNTIO 3 nanoparticles. *ACS Applied Electronic Materials*, 8(7), 2882–2900. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.5c02649>
- [18] Kayes, B. M., Nie, H., Twist, R., Spruytte, S. G., Reinhardt, F., Kizilyalli, I. C., & Higashi, G. S. (2011, June). 27.6% conversion efficiency, a new record for single-junction solar cells under 1 sun illumination. In 2011 37th IEEE photovoltaic specialists conference (pp. 000004-000008). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2011.6185831>
- [19] Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M., & Quaicoe, J. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy*, 86(10), 1823–1835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.017>
- [20] Larminie, J., A. Dicks. (2003). Fuel Cell Systems Explained. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. <https://doi.org/10.1002/9781118878330>
- [21] Liu, Y., Shi, X., Wu, T., Wu, H., Mao, Y., Cao, T., Wang, D., Liu, W., Li, M., Liu, Q., & Chen, Z. (2024). Boosting thermoelectric performance of single-walled carbon nanotubes-based films through rational triple treatments. *Nature Communications*, 15(1), 3426. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47417-y>
- [22] Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- [23] Mao, M., Zhao, Q., Tao, J., Mu, Q., He, X., & Li, J. (2026). Humidity-Adaptive triboelectric Contact/Noncontact sensing and energy harvesting enabled by Plant-Ash- and Ammonium-Salt-Coengineered cellulose Aerogel. *ACS Sensors*, 11(5), 3628–3642. <https://doi.org/10.1021/acssensors.5c03018>
- [24] Paleczek W. (2026). Hydrodynamika pływających robotów humanoidalnych dla budownictwa hydrotechnicznego i techniki sanitarnej [Fin Hydrodynamics in the Design of Swimming Humanoid Robots for Hydraulic Engineering and Sanitary Technology]. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 100(1): 18–25. <https://doi.org/10.65545/GWITS.2026.01.04>
- [25] Sadouqi, A., Chargui, T., Idrissi, R. E., & Lmai, F. (2026). Numerical validation and machine learning-based modeling of energy conversion efficiency in Cs₂AgBi_{0.75}Sb_{0.25}Br₆ double perovskite solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 302, 114330. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2026.114330>
- [26] Sample A. P., D. T. Meyer and J. R. Smith. (2011). Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011, <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2046002>
- [27] Sheng, M., Yang, Y., Bin, X., Zhao, S., Pan, C., Nawaz, F., & Que, W. (2021). Recent advanced self-propelling salt-blocking technologies for passive solar-driven interfacial evaporation desalination systems. *Nano Energy*, 89, 106468. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106468>
- [28] Shinohara N. (2014). Wireless Power Transfer via Radio-waves. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118863008>
- [29] Snyder, G., Toberer, E. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Mater* 7/2008, 105–114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>
- [30] Subhanjaneyulu, P. V., Sahu, S. K., Kumar, C., Gotte, M. P., & Sreekanth, P. S. R. (2026). Electrolyte–surface synergy in biomass-derived carbon electrodes for supercapacitors. *Journal of Materials Science*, 61(28), 20041–20076. <https://doi.org/10.1007/s10853-026-12964-w>
- [31] Tariq, M. Z., Lee, B., Choi, D., & Park, S. J. (2026). Triboelectric enhancement in Droplet-Based electricity generators via Nafion-Functionalized cellulose nanocrystals. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 18(6), 10363–10371. <https://doi.org/10.1021/acsaami.5c23895>
- [32] Tavano, R., Randall, J. D., Thao, N. N. L., Creighton, C., Xu, J., Henderson, L. C., & Asp, L. E. (2026). Partially carbonised carbon fibres as improved electrodes for structural battery applications. *Communications Materials*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s43246-026-01194-x>

- [33] Tirpude, M. P., Tayade, N. T., Khan, M. N. A., Tiwari, R. S., Singh, V. V., Hussain, A. a. M., Dhangada, P. J., & Prabhu-karwatkar, P. A. (2026). Indian salmon fish-scales based novel triboelectric nanogenerators and its enhanced performance. *Sensors and Actuators a Physical*, 408, 117980. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2026.117980>
- [34] Vinayagam, K., Saravanan, N., & Sundaramurthy, A. (2026). Fabrication of aluminium modified Bi2O3 thin film as a transparent conductive oxide for optoelectronic applications. *Discover Surfaces*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44507-026-00003-9>
- [35] Wang, Z. L. (2013). Triboelectric nanogenerators as new energy technology for Self-Powered systems and as active mechanical and chemical sensors. *ACS Nano*, 7(11), 9533–9557. <https://doi.org/10.1021/nn404614z>
- [36] Wang, Z. L., & Song, J. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on Zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 312(5771), 242–246. <https://doi.org/10.1126/science.1124005>
- [37] Wu, Y., Zhang, T., Zhang, F., Wang, Y., Ma, Y., Huang, Y., Liu, Y., & Chen, Y. (2012). In situ synthesis of graphene/single-walled carbon nanotube hybrid material by arc-discharge and its application in supercapacitors. *Nano Energy*, 1(6), 820–827. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.07.001>
- [38] Xu, D., W. Hu, X. N. Sun, P. Cui, and X. Y. Chen. (2017). Redox Additives of Na₂MoO₄ and KI: Synergistic Effect and the Improved Capacitive Performances for Carbon-Based Supercapacitors. *Journal of Power Sources* 341: 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.031>.
- [39] Yang, L. (2026). A Review of Underwater Inductive Wireless Power Transfer and Capacitive Wireless Power Transfer System. In: *Undersea Power Conversion and Wireless Power Transfer Technology*. Smart Energy Systems. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-95-7222-9_2
- [40] Zebda, A., Cosnier, S., Alcaraz, J., Holzinger, M., Goff, A. L., Gondran, C., Boucher, F., Giroud, F., Gorgy, K., Lamraoui, H., & Cinquin, P. (2013). Single glucose biofuel cells implanted in rats power electronic devices. *Scientific Reports*, 3(1), 1516. <https://doi.org/10.1038/srep01516>
- [41] Zhang, X.G. (1996). Electrochemistry of Zinc Oxide. In: *Corrosion and Electrochemistry of Zinc*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9877-7_4
- [42] Zheng, Y., Zhang, G., Huan, Z., Zhang, Y., Yuan, G., Li, Q., Ding, G., Lv, Z., Ni, W., Shao, Y., Liu, X., & Zu, J. (2024). Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges. *Space Solar Power and Wireless Transmission*, 1(1), 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.sspwt.2023.12.001>
- [43] Ziomek, L. (1985). Underwater acoustics: a linear systems theory approach. Elsevier.
- [44] Ziomek, L. (2020). *Fundamentals of acoustic field theory and space-time signal processing*. CRC Press.
- [45] Ziomek, L. (2022). *An Introduction to Sonar Systems Engineering*. CRC Press.
- [46] Zopf, D. A., Hollister, S. J., Nelson, M. E., Ohye, R. G., & Green, G. E. (2013). Bioresorbable Airway Splint Created with a Three-Dimensional Printer. *New England Journal of Medicine*, 368(21), 2043–2045. <https://doi.org/10.1056/nejmc1206319>