

# Przegląd różnorodnych źródeł dla pozyskiwania energii w procesie harwestingu

PAWEŁ LIGĘZA 

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków*

## Streszczenie

Transformacja energetyczna wymaga zastąpienia elektrowni bazujących na surowcach kopalnych energią odnawialną. Ważną, choć nie do końca docenianą rolę odgrywa tu harwesting energii. Rozproszone, lokalne systemy zasilania niewielkich odbiorników, bazujące na różnorodnych źródłach energii uprzednio rozpraszanej, mogą przyczynić się do zmiany dotychczasowego paradygmatu energetyki. Artykuł przedstawia przegląd technologii harwestingu energii oraz zróżnicowanych źródeł energii wykorzystywanych w tym procesie. Szczególną uwagę zwrócono na źródła o mniej konwencjonalnym charakterze. Celem artykułu jest zachęcenie i ukierunkowanie naukowców posiadających potencjał do eksploracji tej tematyki do poszukiwania nowych, dotychczas nieeksploatowanych źródeł energii oraz innowacyjnych i efektywnych metod pozyskiwania energii użytecznej w procesie harwestingu.

**Słowa kluczowe:** harwesting energii, lokalne źródła energii, przetwarzanie energii, energia rozproszona, energia odnawialna

## 1. Wprowadzenie

Harwesting, czyli zbieranie energii jest szerokim i nie do końca sprecyzowanym pojęciem. Standardowo przyjmuje się, że jest to pozyskiwanie z otoczenia niewielkich ilości energii, która naturalnie byłaby rozproszona, z przeznaczeniem do lokalnego zasilania urządzeń elektronicznych o małym poborze mocy [1]. Wydaje się jednak, że tak sprecyzowane pojęcie harwestingu energii jest bardzo zawężone. Ograniczenie ilości energii, jej formy i sposobu wykorzystania stanowczo nie odzwierciedla istoty tej koncepcji. Intuicyjnie granica pomiędzy elektrownią a harvesterem istnieje, ale jest płynna i trudna do zdefiniowania. Przykładowo farma turbin wiatrowych to zdecydowanie odmienne przedsięwzięcie od małej turbiny zasilającej oświetlenie czy sygnalizację przejścia dla pieszych na drodze. Jednak jaka wielkość i ilość turbin stanowi granicę pozostaje otwartym zagadnieniem [2].

Wydaje się, że do zdefiniowania harwestingu energii należy podejść w odmienny sposób. W idei tej chodzi przede wszystkim o pozyskiwanie energii w sposób ekologiczny, przyjazny dla ludzi i środowiska. Chodzi o poszukiwanie i wykorzystanie źródeł energii, która bez harwestingu jest rozpraszana, bezużytecznie i bezpowrotnie ginie w bezmiarze wzrostu entropii. Istotą harwestingu jest inteligentne pozyskiwanie energii bez nadmiernej ingerencji w środowisko, a więc świat ludzi, zwierząt, roślinność, krajobraz, klimat, glebę, zasoby wodne i wszystko, co stanowi bezcenny skarb nasz i przyszłych pokoleń.

Poszukiwanie zróżnicowanych źródeł energii dla harwestingu stanowią ciągle wyzwania dla środowiska naukowego.

Tematem tego artykułu jest przedstawienie zróżnicowanych źródeł energii wykorzystywanych w procesie harwestingu, ze szczególnym zwróceniem uwagi na źródła o mniej konwencjonalnym charakterze. Ma to na celu zachęcenie i ukierunkowanie naukowców eksplorujących tę tematykę do poszukiwania nowych, dotychczas nieeksploatowanych źródeł energii oraz innowacyjnych i efektywnych metod pozyskiwania energii użytecznej. Zapraszam także do podzielenia się wynikami swoich oryginalnych badań w dziedzinie harwestingu energii na łamach numeru specjalnego *Energies*: „Development of Energy Harvesting Systems and Methods from Uncommon Sources” [3].

## 2. Łańcuch przetwarzania energii w procesie harwestingu

Proces harwestingu energii polega na przetwarzaniu form energii od energii źródłowej do energii użytecznej. Źródła energii i formy energii źródłowej są bardzo zróżnicowane, poszukiwanie możliwych do wykorzystania źródeł stanowi ciągle wyzwanie. Energia użyteczna w procesie harwestingu to najczęściej energia elektryczna, stanowiąca w wielu zastosowaniach najbardziej pożądaną formę energii. Energia elektryczna pozwala na stosunkowo łatwe i efektywne przesyłanie, magazynowanie i wykorzystanie w urządzeniu końcowym [4]. Spotyka się także harwestery, w których energią końcową jest na przykład ciepło wykorzystywane do ogrzewania budynków [5]. Elementy typowych łańcuchów przetwarzania energii w procesie harwestingu zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Łańcuch przetwarzania energii w procesie harwestingu

Energia źródłowa	Rodzaj energii	Metoda przetwarzania	Magazynowanie energii
energia mechaniczna	ruch	elektrodynamiczna piezoelektryczna tryboelektryczna	superkondensatory
	fale		
	wibracje		
	ciśnienie		
energia termiczna	różnica temperatur	termoelektryczna silnik cieplny + elektrodynamiczna	akumulatory
	zmiana temperatury	piroelektryczna	sprężone powietrze
energia elektromagnetyczna	światło	fotowoltaiczna termoelektryczna	wirująca masa
	fale radiowe	elektryczna elektroniczna	energia potencjalna cieczy
energia chemiczna	energia wiązań chemicznych	ogniwa elektrochemiczne ogniwa paliwowe silnik cieplny + elektrodynamiczna	wodór
energia jądrowa	energia radioizotopów	ogniwa jądrowe	

Energia źródła to najczęściej energia mechaniczna, termalna oraz elektromagnetyczna. Jako energię źródła można także analizować energię chemiczną i nuklearną, choć jest to raczej sporadycznie spotykane w publikacjach dotyczących harwestingu energii [6]. Energia mechaniczna źródła może przybierać różne formy, co implikuje różnorodne rozwiązania techniczne harwesterów. Wykorzystuje się ruch ukierunkowany, na przykład pojazdów, wody czy powietrza. Inną formą jest ruch falowy, w szczególności mórz i oceanów. Przetwarzaniu mogą także podlegać wibracje mechaniczne, na przykład takich obiektów technicznych jak mosty i wiadukty. W procesie harwestingu rozważane jest również wykorzystanie fal ciśnienia, na przykład hałasu generowanego przez ruch pojazdów. Do przetwarzania energii mechanicznej na prąd elektryczny stosuje się najczęściej jedną z trzech metod, elektrodynamiczną, piezoelektryczną oraz ostatnio coraz częściej tryboelektryczną.

Przetwarzanie elektrodynamiczne (elektromechaniczne) wykorzystuje zjawisko indukcji elektromagnetycznej, polegające na powstawaniu siły elektromotorycznej w przewodniku oddziaływającym ze zmiennym strumieniem magnetycznym [7]. To główna metoda przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną wykorzystywana powszechnie w elektrowniach czy pojazdach. Postęp technologii produkcji silnych magnesów stałych był jednym z czynników pozwalających na rozwój pojazdów elektrycznych, w których przetwornik elektrodynamiczny służy zarówno do napędu pojazdu, jak i do odzyskiwania energii elektrycznej z ruchu podczas hamowania [8].

W procesie przetwarzania piezoelektrycznego wykorzystywane jest zjawisko powstawania ładunków elektrycznych na powierzchni niektórych materiałów poddanych naprężeniu mechanicznemu [9]. Właściwości piezoelektryczne wykazują niektóre monokryształy i polikryształy, ceramiki oraz polimery syntetyczne. Napięcia elektryczne indukowane w materiałach piezoelektrycznych mogą osiągać znaczne wartości, jednak generowane moce z jednostki objętości są niewielkie.

Przetwarzanie tryboelektryczne wykorzystuje zjawisko generowania ładunków elektrycznych w odpowiednio dobranych materiałach oddziałujących ze sobą przez kontakt, tarcie lub zbliżanie [10]. Materiały dobierane są parami w taki sposób, aby były odległe w szeregu tryboelektrycznym. Przykładem takiej pary są teflon i aluminium. Technologie przetwarzania tryboelektrycznego oraz konstrukcje nanogeneratorów

tryboelektrycznych są obecnie intensywnie rozwijane oraz wdrażane zarówno w systemach przemysłowych jak i w przedmiotach codziennego użytku.

Energia termalna może być wykorzystana bezpośrednio, na przykład do ogrzewania budynków czy topienia śniegu i lodu [11]. Wymaga to zastosowania wymienników ciepła oraz przewodów cieplnych. Coraz częściej stosuje się tu również efektywne pompy ciepłe. Przetwarzanie energii termicznej na prąd wymaga najczęściej dwóch źródeł różniących się znacząco temperaturą. Jeśli warunki na to pozwalają do przetwarzania można zastosować konwencjonalny układ mechanicznego silnika cieplnego oraz generatora elektrodynamicznego. Dla harwesterów stosuje się często przetwarzanie termoelektryczne, oparte na zjawisku Seebecka [12]. Polega ono na powstaniu siły elektromotorycznej w obwodzie zawierającym złącza różnych metali lub półprzewodników znajdujące się w różnych temperaturach. Komercyjnie dostępne są moduły Peltier, które można wykorzystać w termicznych harwesterach do generacji prądu [13]. Możliwa jest także generacja prądu z jednego źródła termicznego, którego temperatura zmienia się w czasie. Stosowane jest tu zjawisko piroelektryczne, polegające na postawaniu w niektórych kryształach siły elektromotorycznej pod wpływem zmiany temperatury. Część materiałów piezoelektrycznych posiada także właściwości piroelektryczne [14].

Wszechobecna energia elektromagnetyczna stanowi ważne źródło wykorzystywane w harwesterach. Podstawową formą energii jest tu światło przetwarzane na prąd elektryczny w ogniwach fotowoltaicznych [15]. Zjawisko fotowoltaiczne, polegające na wzbudzeniu za pomocą światła w ciałach stałych elektronów, jest obecnie na ogromną skalę stosowane w panelach fotowoltaicznych do produkcji energii elektrycznej. Ogniwa i panele fotowoltaiczne stanowiące efektywne źródło energii elektrycznej są oczywiście również stosowane w harwesterach.

Wzrost temperatury ciał pod wpływem pochłaniania energii elektromagnetycznej, na przykład podczerwieni, umożliwia również wykorzystania przetwarzania termoelektrycznego w harwesterach. Z szerokiego widma energii elektromagnetycznej możliwe jest ponadto wykorzystanie częstotliwości radiowych [16]. Odpowiednia antena z układem prostownika i filtra może w wybranych lokalizacjach pozwolić na zasilanie odbiorników niewielkiej mocy. Na podobnej zasadzie możliwe jest pozyskiwanie energii z wyładowań atmosferycznych.

Energia chemiczna zawarta w wiązaniach chemicznych substancji może również stanowić źródło dla harwesterów. Może tu być wykorzystany na przykład metan pochodzący z procesów biologicznych, wodór lub inny rodzaj paliwa [17]. Przetwarzanie na energię elektryczną może odbywać się konwencjonalnie w układzie silnika cieplnego z generatorem elektrodynamicznym lub w ogniwach elektrochemicznych i ogniwach paliwowych [18]. Potencjalnie energia nuklearna może również stanowić energię źródłową w harwesterach. Izotopy emitujące podczas rozpadu promieniowanie beta stosowane są w bateriach nuklearnych do wytwarzania prądu [19]. Izotop stanowi elektrodę dodatnią, a promieniowanie beta wychwytywane jest przez drugą elektrodę, która zyskuje potencjał ujemny.

Niezależnie od źródła energii ostatnim elementem łańcucha przetwarzania w procesie harwestingu przed jej wykorzystaniem jest magazynowanie. Jeżeli energia elektryczna w harwesterze jest wytwarzana w sposób ciągły i w ilości wystarczającej do zasilenia końcowego odbiornika systemu magazynowania energii nie są wymagane. Jednak najczęściej energia elektryczna w harwesterach wytwarzana jest nieregularnie i konieczny jest proces jej magazynowania. Podstawowym rozwiązaniem jest tu stosowanie kondensatorów, superkondensatorów oraz akumulatorów [20]. Energia elektryczna jest tu gromadzona bezpośrednio i bezpośrednio dostępna. Stosuje się także rozwiązania polegające na zamianie energii elektrycznej w inną formę energii, na przykład w energię kinetyczną ruchu obrotowego masy w magazynach *flywheel* [21], energię potencjalną cieczy w magazynach *pumped hydro* [22] czy energię ciśnienia gazu w zbiornikach *compressed air* [23]. Ważnym rozwiązaniem o coraz szerszym zastosowaniu jest produkcja wodoru [24].

### 3. Typowe i niekonwencjonalne źródła energii dla harwesterów

W poprzedniej sekcji przedstawiono strukturę łańcucha przetwarzania energii w procesie harwestingu. Początek i koniec łańcucha wymaga punktu zakotwiczenia. Odbiornik użytkowy, którego zasilanie stanowi cel dla harwestera znajduje się na końcu łańcucha. Natomiast początek łańcucha wymaga pierwotnego źródła energii. Rodzaj i parametry źródła stanowią kluczowe elementy implikujące strukturę i efektywność całego systemu. Harwestery wykorzystują energię z otoczenia, zarówno pochodzącą z natury jak i antropogeniczną. Bez zastosowania harwestera energia ta ulega rozproszeniu. Źródło energii powinno znajdować

się w pobliżu odbiornika i zapewniać wymaganą wydajność. Muszą także istnieć odpowiednie warunki techniczne do pozyskania i efektywnego przetwarzania energii ze źródła. Konwencjonalne źródła to przede wszystkim światło słoneczne przetwarzane w panelach fotowoltaicznych oraz wiatr napędzający turbiny. Te rozwiązania pozwalają w wielu przypadkach na wydajne i efektywne zasilanie odbiorników takich jak oświetlenie, sygnalizacja, sterowanie, monitoring, terminale, czujniki i akulatory czy transmisja danych.

Trwają jednak nieustanne poszukiwania mniej konwencjonalnych źródeł, których właściwości można wykorzystać w różnorodnych zagadnieniach i procesach szczegółowych, wymagających lokalnego źródła zasilania. W tej sekcji przedstawiono przegląd tego typu źródeł wraz z krótką charakterystyką zastosowanego harwestera oraz rodzaju odbiornika.

## 4. Źródła pochodzenia naturalnego

### 4.1. Falowanie wody

Przykład harwestera przetwarzającego energię fal oceanicznych na energię elektryczną przedstawiono w artykule [25]. Wykorzystano tu przetwarzanie z wykorzystaniem zjawiska piezoelektrycznego. Autorzy rozważają system złożony z dwóch bloków o znacznej bezwładności i o różnych masach, połączonych belkami piezoelektrycznymi. Modelowanie tego systemu dla zmiennej wartości stosunku obu mas pozwala na optymalizację efektywności energetycznej dla zadanych wymuszeń. Porównanie wyników modelowania z eksperymentem pozytywnie weryfikuje przyjęta koncepcję. Ten system pozyskiwania energii przewidziany jest do zasilania aerologicznej boji oceanicznej monitorującej stan oceanu i pogody. Przedstawiony system pozwala na uzyskanie średniej mocy elektrycznej około 5 mW, co w połączeniu z układem magazynowania i zarządzania energią jest wystarczające do zasilania układu monitoringu aerologicznego.

Wykorzystanie energii fal morskich do zasilania systemów monitoringu mostów morskich przedstawiono w artykule [26]. Harwestery energii montowane są na filarach mostu. Zbudowane są z boji umieszczonej na powierzchni morza, wykonującej wymuszony falami ruch posuwisto-zwrotny. Ruch ten zamieniany jest następnie na jednokierunkowy ruch obrotowy w mechanicznym, autorskim układzie przekładni ze sprzęgłami jednokierunkowymi. Ostatnim elementem tego harwestera energii jest obrotowy generator elektromagnetyczny wytwarzający energię elektryczną. Energia ta jest magazynowana w superkondensatorach i wykorzystana do zasilania systemów monitorowania mostu morskiego. Autorzy przeprowadzili badania symulacyjne proponowanego systemu oraz przebadali prototyp laboratoryjny. W zależności od amplitudy i częstotliwości fal uzyskano moce od 0,12 W dla amplitudy 2 mm i częstotliwości 1 Hz, do 2,36 W dla amplitudy 6 mm i częstotliwości 2 Hz.

W artykule [27] zaproponowano wykorzystanie przetwarzania tryboelektrycznego do pozyskania energii elektrycznej z ruchu fal. Przeznaczeniem systemu jest zasilanie monitoringu stanu morza. Przetwornik zbudowany jest z pionowego wahadła z zamocowaną w dolnej części płetwą umieszczoną w morzu i wymuszającą ruch wahadła. Ruch ten przetwarzany jest na ruch obrotowy poprzez przekładnie zębate i przekazywany do dwóch generatorów tryboelektrycznych. W celu podniesienia efektywności systemu zastosowano dwa generatory zoptymalizowane dla dwóch amplitud fal – małych i dużych. Generatory wykonane są w postaci dwóch współosiowych bębnow – stacjonarnego i obrotowego. Bęben obrotowy posiada elastyczne polimerowe łopatki, które trą o elektrody miedziane bębna stacjonarnego. W prototypowym modelu uzyskano moc 0,7 mW przy amplitudzie fali 120 mm i częstotliwości 1 Hz.

Harwester energii fal morskich wykorzystujący przetwarzanie tryboelektryczne, jednak o odmiennej budowie zaprezentowano w artykule [28]. Przetwornik ten ma formę kuli z materiału izolacyjnego pływającej po powierzchni morza. Wewnątrz kuli na wspólnej osi umieszczone są półkolisty powierzchnie, które mogą się do siebie zbliżać i oddalać. Powierzchnie pokryte są elektrodami oraz akrylowym materiałem izolacyjnym. Dzięki zjawisku tryboelektrycznemu wzajemne przemieszczanie się powierzchni półkolistych powoduje wytworzenie energii elektrycznej. W zoptymalizowanym prototypie umieszczono cztery symetryczne sekcje uzyskując maksymalną moc prądu 16,6 mW. Autorzy przewidują szeroki obszar aplikacyjny tej technologii pozyskiwania energii, począwszy od zaprezentowanej aplikacji w bezprzewodowym termometrze cyfrowym, do koncepcji morskiego Internetu Rzeczy.

W artykule [29] proponuje się wykorzystanie ruchów wody w głębszych warstwach do zasilania urządzeń podwodnych. Zastosowano tu przetwarzanie elektromagnetyczne z liniowym przetwornikiem umieszczonym w wodoszczelnej obudowie. Przetwornik posiada cewki nawinięte na odcinku rury, w której

pod wpływem sił bezwładności może przemieszczać się magnes. Kształt obudowy zaprojektowano tak, aby poruszała się pod wpływem ruchu wody. Zmiany prędkości i kierunku ruchu obudowy powodują bezwładne przemieszczanie się magnesu w cewce i generację prądu. W badanym prototypie uzyskano w zależności od częstotliwości falowania moc od 1,31 mW przy 0,1 Hz do 7,73 mW przy 0,4 Hz. Planowanym zastosowaniem jest zasilanie czujników zmiętnienia wody.

#### 4.2. Turbulencja powietrza

Niekonwencjonalne wykorzystanie energii wiatru zaproponowano w artykule [30]. Proponowany harwester wykorzystuje chaotyczne, turbulentne podmuchy wiatru w zakresie niskich częstotliwości. Zastosowano tu przetwarzanie tryboelektryczne, przy czym wykorzystano naturalne liście jako materiał tryboelektryczny. Eksperymentalny harwester zbudowany jest z liścia z podłączoną elektrodą oraz warstwy polimeru umieszczonej blisko powierzchni liścia. Liść wykonując drgania na wietrze zbliża się i oddala od powierzchni polimeru indukując ładunki i przepływ prądu przez elektrodę do odbiornika. Drugi kontakt odbiornika jest uziemiony. Autorzy eksperymentowali z różnymi gatunkami liści uzyskując napięcia rzędu 100 V i prądy w zakresie pojedynczych mikroamperów. Autorzy raportują uzyskanie maksymalnej gęstości mocy 45 mW/m<sup>2</sup>. Proponowanym zastosowaniem jest zasilanie oświetlenia LED lub podświetlenie reklam.

Dalszym rozwinięciem tej koncepcji jest wykonanie drgającego na wietrze harwestera tryboelektrycznego z warstw wykonanych z prasowanego proszku z suszonych liści modyfikowanego polimerami organicznymi [31]. Zastosowano tu także miedziane elektrody warstwowe. W porównaniu z przetwornikiem z naturalnego liścia uzyskano dwukrotne zwiększenie prądu i napięcia, a więc czterokrotne zwiększenie mocy. Ta technologia cechuje się również większą powtarzalnością i trwałością przetwornika.

Również zainspirowani trzepotaniem liści na wietrze autorzy artykułu [32] proponują zastosowanie przetwarzania piezoelektrycznego. Proponują harwester wykonany z jednostronnie mocowanej piezoelektrycznej belki, z mocowanym z drugiej strony płatem aerodynamicznym pobudzonym wiatrem. Autorzy rozważają różne kształty płata, przy czym najlepsze rezultaty uzyskują dla kształtu owalnego, inspirowanego liściem. Na podstawie danych pomiarowych z artykułu można oszacować, że maksymalna gęstość mocy uzyskiwana przy prędkości wiatru 20 m/s osiąga 1,5 W/m<sup>2</sup>.

#### 4.3. Opady deszczu

W artykule [33] przedstawiono wyniki badań harwestera energii wykorzystującego energię kinetyczną kropli deszczu. Autorzy proponują wykorzystanie przetworników piezoelektrycznych przetwarzających drgania wywołane uderzeniem kropli deszczu na energię elektryczną. Zaproponowano do badań trzy modele przetworników: drgającą belkę podpartą jednostronnie, belkę podpartą obustronnie oraz promienisty układ belek ze wspólnym, centralnym, kołowym elementem drgającym. Wykonano prototypowe, laboratoryjne przetworniki o rozmiarach od kilku do kilkunastu centymetrów, które poddano badaniom eksperymentalnym. Uzyskane wyniki są trudne do oceny, ponieważ autorzy przedstawiają głównie wykresy napięcia uzyskanego na wyjściu przetworników pod wpływem spadających kropli wody z wysokości od 0.5 do 2 m. Ze względu na brak wielu parametrów eksperymentów można jedynie oszacować, że uzyskiwana moc średnia z przetwornika wynosi nie więcej niż 1 mW. Przedstawione badania mają charakter wstępny i są bardzo odległe od przejścia do fazy aplikacyjnej.

Nieco bardziej rozbudowaną technologię pozyskiwania energii z opadów deszczu proponują autorzy pracy [34]. Tu również wykorzystano przetwarzanie piezoelektryczne, jednak prototypowy harwester jest bardziej złożony. Opady deszczu są zbierane przez lej o znacznych rozmiarach i doprowadzane do zbiornika zamocowanego na obrotowej osi. Zbiornik jest tak skonstruowany, że po osiągnięciu określonego poziomu wody następuje jego opróżnienie, a strumień wody uderza w płytkę zamocowaną na belce przetwornika piezoelektrycznego. A więc następuje cykliczna produkcja porcji energii. Autorzy przeprowadzają teoretyczną i modelową analizę tego procesu oraz przedstawiają wyniki eksperymentu laboratoryjnego. Niestety także w tej pracy przedstawiane są głównie uzyskane przebiegi napięcia uzyskanego z przetwornika. Można oszacować, że w prototypowym systemie autorzy uzyskują w pojedynczym cyklu elektryczną moc szczytową 180 mikrowatów, a więc moc średnia jest na poziomie pojedynczych mikrowatów.

Inną metodę przetwarzania energii opadów deszczu na energię elektryczną opisano w artykule [35]. Zastosowano tu przetwarzanie z wykorzystaniem nanogenerators tryboelektrycznego. Krople deszczu mogą posiadać ładunek elektrostatyczny oraz posiadają energię kinetyczną. Uderzając w powierzchnię

nanogeneratorsa tryboelektrycznego przekazują tę energię, której część zamieniana jest na użyteczną energię elektryczną. Autorzy proponowanego harwestera opracowani do tego celu specjalną, siatkową strukturę przetwornika, która zapobiega wzajemnemu oddziaływaniu i gromadzeniu się kropli deszczu. W artykule raportowana jest uzyskana maksymalna gęstość mocy na poziomie  $110 \text{ mW/m}^2$ , co stanowi ponad dwieście razy więcej niż w przetwornikach o konwencjonalnej, bezsiatkowej strukturze. Uzyskano także znaczne rozszerzenie zakresu wielkości opadów umożliwiających efektywną pracę. Autorzy uważają, że proponowane rozwiązanie przyczyni się do rozwoju tej technologii na znaczną skalę.

#### 4.4. Opady śniegu

W artykule [36] autorzy zaproponowali wykorzystanie opadów śniegu do pozyskiwania energii elektrycznej. Przeznaczeniem tego harwestera jest według autorów zasilanie stacji pogodowych. Wskazują tu na możliwość hybrydyzacji z panelami fotowoltaicznymi. Może także znaleźć zastosowanie do zasilania układów monitorowania zawodników w sportach zimowych. W proponowanym rozwiązaniu do pozyskania energii autorzy stosują zjawisko tryboelektryczne wywołane uderzeniem i tarciem śniegu o powierzchnię harwestera. Jest on wykonany w technologii druku 3D w postaci elastycznej folii z silikonu utwardzonego promieniami UV. Jako elektrody zastosowano polimer PPS. Technologia druku 3D umożliwia wykonanie harwestera w dowolnym wymaganym kształcie, w zależności od przeznaczenia. W badaniach prototypu autorzy uzyskali chwilową gęstość mocy  $0,2 \text{ mW/m}^2$ .

#### 4.5. Wyładowania atmosferyczne

Potencjalnie potężnym źródłem energii dla harwesterów są wyładowania atmosferyczne. Energia pojedynczego wyładowania jest szacowana na miliardy dżuli. Jednak w tym przypadku problemy związane z kontrolowaniem oraz efektywną i bezpieczną absorpcją wyładowań pozostają na wstępnym etapie analiz, koncepcji i badań. W artykule [37] zebrano informacje na temat potencjalnych metod pozyskiwania energii z wyładowań atmosferycznych. Jedną z metod jest połączenie równoległe wielu odpowiednio przystosowanych instalacji odgromowych, zastosowanie prostowników i gromadzenie pozyskanej energii elektrycznej w bateriach kondensatorów. Proponowane jest też inwersyjne wykorzystanie cewki Tesli jako transformatora obniżającego napięcie indukowane w instalacji odgromowej. Inną koncepcją jest metoda pośrednia, to znaczy wykorzystanie energii towarzyszącej wyładowaniu, a więc energii świetlnej, cieplnej lub mechanicznej. Te formy energii przetwarzane są za pomocą konwencjonalnych metod i magazynowane w bateriach kondensatorów z przeznaczeniem do wykorzystania. Rozważane jest też wykorzystanie energii wyładowań do elektrolizy wody i wytwarzania wodoru. Podejmowane są próby kontroli wyładowań poprzez utworzenie ścieżki wyładowania za pomocą lasera. Ciągle brakuje jednak publikacji i raportów o zrealizowanych efektywnych zastosowaniach tego rodzaju źródła pozyskiwania energii.

#### 4.6. Energia wulkanów

Wykorzystanie przetwarzania termoelektrycznego do pozyskiwania energii zasilającej stację monitorowania wulkanu zaproponowano w artykule [38]. Energia geotermalna często wykorzystywana jest do ogrzewania, natomiast istnieje stosunkowo niewiele zastosowań do produkcji energii elektrycznej. Powodem jest mała efektywność takiego systemu. W przedstawionym harwesterze autorzy umieścili przetworniki termoelektryczne bazujące na efekcie Seebecka pomiędzy wysokosprawnymi wymiennikami ciepła, opartymi na przewodach termicznych z przemianą fazową czynnika oraz radiatorach. Wymienniki pobierają ciepło z fumaroli wulkanicznych, a oddają ciepło do powietrza. Prototyp został zamontowany przy wulkanie Teide na Wyspach Kanaryjskich i przy różnicy temperatur  $51,5 \text{ K}$  generuje moc  $0,49 \text{ W}$ , co w zupełności wystarcza do zasilania stacji akwizycji i transmisji danych. Jako zalety systemu zasilania można wymienić bezobsługowość, trwałość, niezawodność, kompaktowość oraz neutralność środowiskową.

Zbliżony system, przeznaczony do zasilania systemu całorocznego monitorowania wulkanu Erebus, Ross Island zaprezentowano w artykule [39]. Budowa harwestera jest analogiczna do poprzednio opisanego, zastosowano przetwornik termoelektryczny oraz wymienniki ciepła z przewodami termicznymi. System zamontowano w gorącym gruncie na głębokości  $0,5 \text{ m}$ , gdzie temperatura wynosi około  $80^\circ\text{C}$ . Przy temperaturze powietrza  $-20^\circ\text{C}$  różnica temperatur sięga  $100 \text{ K}$ . W tym opracowaniu uzyskano średnią moc zasilania  $270 \text{ mW}$ .

## 5. Źródła pochodzenia biologicznego

### 5.1. Organizmy żywe

Koncepcję, budowę oraz wyniki badań bezprzewodowego modułu śledzenia zwierząt z harwestem energii omówiono w pracy [40]. Miniaturowy moduł montowany jest na monitorowanym zwierzęciu i składa się z odbiornika GPS, zestawu czujników, mikrokontrolera, nadajnika radiowego oraz harwestera energii. Wykorzystano tu mikro panel fotowoltaiczny z superkondensatorem do magazynowania energii elektrycznej. System zarządzania energią pozwala na ładowanie magazynu w czasie, gdy promieniowanie słoneczne jest dostępne oraz chwilowy pobór mocy o znacznej wartości do zasilania odbiornika GPS oraz nadajnika transmisji danych. W stanie uśpienia pobierana moc wynosi 0,054 mW, odbiornik GPS wymaga 89,1 mW, natomiast nadajnik zasilany jest mocą 1254 mW. Prototypowy system zastosowano do śledzenia i monitorowania iguany na wyspie Galapagos.

Odmienne rozwiązanie zasilania modułu monitorowania zwierząt lub ludzi przedstawiono w artykule [41]. W tym rozwiązaniu do wytwarzania energii elektrycznej wykorzystana została energia wibracji wywołanych ruchem osobnika. Zastosowano tu przetwarzanie elektromagnetyczne. Harwester energii zbudowany jest z dysku wirnika zawierającego magnesy stałe oraz stojana z wbudowanymi cewkami. Wirnik zbudowany jest w ten sposób, że posiada środek masy przesunięty względem osi obrotu. Siły bezwładności wywołane ruchem powodują drgania i obroty wirnika, a tym samym indukcję energii elektrycznej w cewkach stojana. System uzupełniony jest układem zarządzania i magazynowania energii. Autorzy przedstawiają wyniki badań modelowych i laboratoryjnych opracowanego harwestera dla różnych wymuszeń drgań oraz miejsc zamontowania na ciele. Prototyp pozwolił na uzyskanie maksymalnej mocy 25,8 mW podczas biegu 15 km/h.

Trudnego zadania konstrukcji harwestera energii do zasilania modułu monitorowania ryb podjęli się autorzy pracy [42]. Harwester zbudowany jest w postaci nanogenerators tryboelektrycznego izolowanego od zewnętrznego środowiska workiem powietrznym i montowany jest na bocznej powierzchni ogona ryby. Energia mechaniczna ruchu wahadłowego rybiego ogona przetwarzana jest tu na użyteczną energię elektryczną. Przetwornik został wykonany z elastycznego polimeru PTFE z elektrodami z aluminiowej folii. Umieszczono go w worku powietrznym w celu izolacji od zewnętrznego, podwodnego środowiska. Autorzy prezentują wyniki badań laboratoryjnych na modelu ryby. Z prototypu przetwornika uzyskano szczytowe napięcia na poziomie 150 V, oraz moc szczytową 0,74 mW.

Biomechaniczną energię ruchu organizmów żywych, także człowieka, wykorzystali w swojej koncepcji harwestera autorzy artykułu [43]. Zaproponowano tu mechaniczny konwerter liniowo – obrotowy zamieniający wahadłowy ruch elementów ciała, na przykład kończyn, na ruch obrotowy. Ruch obrotowy wykorzystywany jest do generacji prądu w hybrydowym przetworniku elektromagnetycznym i tryboelektrycznym. System zbudowany jest z liniowego, śrubowego stojana z gwintem o dużym skoku. Na nim umieszczony jest wirnik, który przemieszcza się pod wpływem sił bezwładności wykonując ruch obrotowy. Wirnik umieszczony jest w zewnętrznym pierścieniu. Wirnik i pierścień posiadają warstwy oddziałujące tryboelektrycznie, a także wbudowane magnesy i cewki oddziałujące elektromagnetycznie, co umożliwiła hybrydową konwersję energii biomechanicznej na prąd. Zdaniem autorów ten system pozwala na efektywną pracę w zakresie niskich częstotliwości ruchu rzędu pojedynczych herców. W warunkach laboratoryjnych koncepcyjny harwester pozwalał na uzyskanie mocy maksymalnej 0,6 mW. Autorzy proponują zastosowanie tego źródła zasilania na przykład w systemach ciągłego monitoringu biologicznego ze zdalnym pomiarem temperatury i wilgotności ciała.

### 5.2. Ciepło ciała

Wykorzystanie energii cieplnej produkowanej przez organizmy żywe do wytwarzania energii elektrycznej przedstawiono w artykule [44]. Autorzy opracowali technologię wykonania oraz przedstawili wyniki badań harwestera wykorzystującego zjawisko termoelektryczne. Pracuje on na bazie różnicy temperatur ciała i otoczenia. Autorzy opracowali technologię produkcji nici z polimerów przewodzących, a następnie wytwarzania tkaniny stanowiącej generator termoelektryczny. Trudnym problemem są w tym przypadku znaczne wartości rezystancji termicznej pomiędzy tkaniną a źródłami zewnętrznymi oraz duża rezystancja wewnętrzna termooogniwa tekstylnego. Prototypowa próbka tkaniny o powierzchni 25 cm<sup>2</sup> pozwoliła na uzyskanie mocy elektrycznej 0,2 mikrowata przy różnicy temperatur 30 K oraz 1,2 mikrowata dla 65 K. Daje to gęstość mocy odpowiednio 80 mikrowatów / m<sup>2</sup> oraz 480 mikrowatów / m<sup>2</sup>.

Zmiany temperatury w czasie mogą być wykorzystane do produkcji energii elektrycznej dzięki wykorzystaniu generatorów piroelektrycznych. Przykład takiego harwestera przedstawiono w artykule [45]. Autorzy rozważają przetwarzanie ciepła odpadowego powstającego w procesach przemysłowych, przy ogrzewaniu cieczy oraz ciepła wytwarzanego przez organizmy. W badaniach wykorzystano komercyjny przetwornik piezoelektryczny, który posiada również właściwości piroelektryczne. Zbudowany jest z folii piezoelektrycznej pokrytej obustronnie elektrodami. Powierzchnia przetwornika wynosi około 20 cm<sup>2</sup>. Przy zmianach temperatury o 30 K uzyskano maksymalną gęstość mocy 0,34 mW/m<sup>2</sup>. Potencjalnym zastosowaniem wskazanym w artykule są czujniki temperatury z własnym zasilaniem. Autorzy badali także reakcję przetwornika na zbliżenie i dotyk palcem, uzyskując zmiany napięcia na poziomie dziesiątych części wolta. Umożliwia to wykorzystanie modułu jako czujnika zbliżenia i dotyku, a także na przykład monitora oddechu.

Technologia nowych materiałów i przetworników piroelektrycznych stale rozwija się [46]. Autorzy tej pracy przedstawiają aktualny stan i perspektywy rozwoju harwestarów energii opartych na nowych materiałach. Ważną rolę odgrywają tu materiały o strukturze perowskitu, monokryształy oraz grafen. W swoim przeglądzie autorzy omawiają między innymi polimerowo – grafenowy materiał piroelektryczny i piezoelektryczny, który został wykorzystany do budowy samo-zasilającego się czujnika ciśnienia i temperatury noszonego na skórze człowieka. Uzyskano tu gęstość mocy na poziomie 6,2 mW/m<sup>2</sup>. Jednak wiele problemów przy poszukiwaniu materiałów piroelektrycznych o wysokiej gęstości energii pozostaje wciąż do rozwiązania. Prowadzone są prace polegające na łączeniu różnych materiałów, stosowaniu domieszkowania oraz wykorzystaniu polimerów i materiałów organicznych. Problemem jest także uzyskanie długoterminowej stabilności materiałów i przedłużenie cyklu życia przetworników.

## 6. Źródła antropogeniczne związane z komunikacją

### 6.1. Szyny kolejowe

Wykorzystanie energii wibracji szyn podczas przejazdu pociągu przedstawiono w pracy [47]. Autorzy proponują system przekształcania energii mechanicznej drgań szyny na użyteczną energię elektryczną. Przeznaczeniem jest zasilanie monitoringu stanu torów. Tor przetwarzania energii i budowa systemu są konwencjonalna. Pod szyną, na podkładzie kolejowym montowana jest belka osadzona na sprężynach, która podczas przejazdu pociągu wprawiana jest w ruch drgający. Ruch ten zamieniany jest na dwukierunkowy ruch obrotowy w układzie śrubowym. Ruch obrotowy dwukierunkowy zamieniany jest następnie na jednokierunkowy w mechanicznym układzie przekładni ze sprzęgłami jednokierunkowymi. Ostatnim elementem tego harwestera energii jest obrotowy generator elektromagnetyczny wytwarzający podczas przejazdu pociągu użyteczną energię elektryczną. W artykule został zaprezentowany prototyp, przeprowadzono badania modelowe, symulacyjne oraz laboratoryjne. Finalnym eksperymentem było zamontowanie systemu w warunkach rzeczywistych na torach. Podczas przejazdu pociągu uzyskano moc średnią 0,27 W przy prędkości pociągu 20 km/h, oraz 1,12 W dla prędkości 30 km/h.

System wykorzystujący energię ruchu powietrza w otoczeniu torów kolejowych zaprezentowano w artykule [48]. System przeznaczony jest do zasilania automatyki i monitoringu rozjazdów kolejowych. Układ przekształcania ruchu powietrza na energię elektryczną składa się z pionowej wiatrowej turbiny osiowej, trójfazowego generatora elektromagnetycznego z prostownikiem, oraz superkondensatora do magazynowania energii. Konstrukcja turbiny wiatrowej posiada strukturę samo-adaptacyjną, zmieniającą kąt łopat w zależności od prędkości obrotowej. Cały system jest w zasadzie rozwiązaniem konwencjonalnym nieposiadającym znaczących cech nowatorskich. Interesującym aspektem może być potencjalne wykorzystanie tego systemu do przetwarzania energii ruchu powietrza wywołanego przejazdem pociągu. Prezentowany system jest w fazie badań laboratoryjnych, w pomiarach w tunelu aerodynamicznym uzyskano moc średnią 1,08 W dla prędkości powietrza 13 m/s. Nie zaprezentowano aplikacji systemu w warunkach rzeczywistych.

### 6.2. Mosty i wiadukty

Mosty drogowe i kolejowe stanowią obiekty wymagające źródeł energii do oświetlenia, sygnalizacji i sterowania, czy monitorowania stanu. Tu również proponowane jest zastosowanie harwestarów energii. W artykule [49] autorzy rozważają hybrydowy system wykorzystujący drgania mostu oraz wiatr do po-

zyskania energii użytecznej. Zastosowano tu przetwarzanie elektromagnetyczne oraz piezoelektryczne. System zbudowany jest z dwóch belek umieszczonych jedna nad drugą i jednostronnie przymocowanych do obiektu. Na dolnej belce zamontowano uzwojenie przetwornika elektromagnetycznego, a nad nim, na górnej belce magnes stały oraz płat aerodynamiczny, oraz przetwornik piezoelektryczny. Wibracje mostu oraz wiatr pobudzają układ do drgań w zakresie niskich częstotliwości do 45 Hz. Prototyp tego hybrydowego przetwornika poddano badaniom laboratoryjnym na stanowisku wytwarzającym drgania mechaniczne oraz przepływ powietrza. Dla przyspieszeń do  $6 \text{ m/s}^2$  oraz prędkości powietrza do  $6 \text{ m/s}$  moc generowana przez harwester wynosiła maksymalnie  $2,2 \text{ mW}$ .

W artykule [50] proponowany jest układ pozyskiwania energii użytecznej z przetworzenia drgań mostu kolejowego. Autorzy badają konwencjonalny przetwornik piezoelektryczny montowany na jednostronnie mocowanej do mostu belce sprężystej, na której drugim końcu umieszczona jest bezwładna masa. Przedstawiono wyniki modelowania układu oraz badań eksperymentalnych. Podstawowa częstotliwość drgań mostu szacowana jest około  $7,8 \text{ Hz}$ , a przyspieszenia do około  $1 \text{ m/s}^2$ . Proponowany system generuje w takich warunkach napięcia maksymalne na poziomie  $0,1 \text{ V}$ . Niestety autorzy nie podają warunków obciążenia harwestera ani uzyskiwanych mocy. Proponowanym zastosowaniem jest detekcja przejazdu pociągów oraz zasilanie monitoringu mostu.

### 6.3. Tunele komunikacyjne

System przetwarzający energię ruchu powietrza w tunelu kolejowym na energię elektryczną prezentuje artykuł [51]. Potencjalnym przeznaczeniem jest zasilanie systemów monitorowania. Intencją autorów jest wykorzystanie dwóch rodzajów ruchu powietrza w tunelu – naturalnego przepływu oraz przepływu wymuszonego efektem tłoka podczas przejazdu pociągu. Dlatego turbin wiatrowa składa się z dwóch rodzajów wirników pionowych osadzonych na wspólnej osi. Kształt wirników jest optymalizowany dla obu rodzajów przepływów. Tor przetwarzania ruchu obrotowego na energię elektryczną składa się z trójfazowego generatora elektromagnetycznego z wirującym magnesem stałym i nieruchomymi cewkami, prostownika i układu magazynowania energii w postaci baterii superkondensatorów. Autorzy przeprowadzili badania modelowe, symulacyjne oraz eksperymentalne badania prototypu w tunelu aerodynamicznym. Dla prędkości wiatru  $11 \text{ m/s}$  uzyskano moc średnią  $108 \text{ mW}$  i sprawność turbiny  $23,2 \%$ . Zaprezentowano wyniki badań wyłącznie dla fazy laboratoryjnej.

Inny system harwesterów energii przeznaczony do zastosowania w tunelach drogowych omówiono w artykule [52]. System wbudowany jest w jezdnię i pobiera energię z ruchu pojazdów. Podstawowym elementem jest płaska płyta cierna, która pod wpływem oddziaływania opon pojazdu przesuwa się w tył, a zwolniona powraca w przód dzięki sprężynom. Ruch posuwisto zwrotny przekształcany jest w ruch obrotowy w systemie przekładni zębatych. Energię elektryczną wytwarza generator trójfazowy, z którego prąd jest prostowany, a energia gromadzona jest w superkondensatorze. System przeznaczony jest do zasilania układów sterowania, sygnalizacji i monitorowania tunelu drogowego. Dzięki temu rozwiązaniu autorzy przewidują uzyskanie *near - zero energy system*. W pojedynczym prototypie przy przesuwie płyty  $10 \text{ mm}$  i częstotliwości przejazdów  $1,5 \text{ Hz}$  uzyskano średnią moc wyjściową  $5,135 \text{ W}$  i sprawność energetyczną  $64,4\%$ . System dedykowany jest do zastosowania w tunelach, ale praktycznie może być stosowany w dowolnym miejscu jezdni.

Przetwarzanie energii akustycznej generowanej w tunelach podziemnych metra zaproponowano w pracy [53]. Przeznaczeniem systemu wykonanego w postaci powierzchniowych barier akustycznych jest zasilanie monitorowania oraz oświetlenie tuneli. System zbudowany jest modułowo i zawiera moduł wejściowy akwizycji fali dźwiękowej, moduł optymalizacji rezonatora Helmholtza, moduł dostrajania częstotliwości rezonansowej i moduł wytwarzania energii elektrycznej. Energia akustyczna przekształcana jest na użyteczną energię elektryczną w przetwornikach piezoelektrycznych. Autorzy przedstawiają proces modelowania i optymalizacji budowy harwestera. W badaniach laboratoryjnych prototypu pojedynczej komórki harwestera z powierzchni  $16 \text{ cm}^2$  przy poziomie ciśnienia akustycznego  $100 \text{ dB}$  uzyskano moc elektryczną  $100,8 \text{ mikrowata}$ . W proponowanym systemie bariera akustyczna powinna być zbudowana w formie matrycowej ściany złożonej z takich komórek, zapewniając wymagane zwielokrotnienie mocy.

## 7. Wyzwania przyszłości – Mars

W literaturze [54] rozważane są również źródła pozyskiwania energii dla zbliżającej się nieuchronnie załogowej misji na Marsa. Jako podstawowe źródła zasilania planowane są panele fotowoltaiczne oraz energia jądrowa. Jednak jako źródła dodatkowe proponuje się harwestery energii wiatrowej, zastępujące panele w nocy czy w czasie burzy piaskowej. Z dostępnych danych analizowane są potencjalne warunki wiatrowe, lokalizacje i efektywne rozwiązania techniczne. Zagadnienie jest trudne, ponieważ gęstość atmosfery Marsa stanowi w przybliżeniu 1 % gęstości atmosfery ziemskiej, a więc moc tej samej turbiny wiatrowej na Marsie będzie zredukowana o 99% względem Ziemi. Także prędkości wiatru marsjańskiego w strefie przy powierzchniowej są znacznie mniejsze, niż na ziemi. Stanowi to poważne wyzwanie przed konstruktorami przyszłych marsjańskich turbin wiatrowych, które powinny mieć odpowiednio duże rozmiary. Przewiduje się tu stosowanie technologii takich jak np. przy konstrukcji sterowców, a więc lekką konstrukcję szkieletową pokrytą cienkim, wytrzymałym materiałem. Artykuł ten stanowi studium możliwości wykorzystania energii wiatrowej w misji marsjańskiej, wskazywane są potencjalne lokalizacje zapewniające odpowiednie warunki wiatrowe i analizowana efektywność tego rozwiązania. Konkluzje autorów w kwestii możliwości wykorzystania tego źródła zasilania są optymistyczne, jednak oczywiście ogrom problemów pozostaje do rozwiązania, a zapewne wiele problemów nie jest jeszcze nawet poznanych.

## 8. Wnioski końcowe

W artykule omówiono zasady przetwarzania energii w procesie harwestingu oraz przedstawiono przegląd zróżnicowanych źródeł wykorzystywanych w tej technologii. Celem artykułu jest przede wszystkim zapoznanie z problematyką harwestingu energii zespołów badaczy z szeroko pojętej dziedziny nauk technicznych. W szczególności tych naukowców, którzy dotychczas nie zajmowali się bezpośrednio tą dziedziną, a ich potencjał naukowy może przyczynić się do poszukiwania nowatorskich rozwiązań. Analiza aktualnego stanu wiedzy w zakresie problemów, wyzwań i perspektyw harwestingu energii skłaniają do zdefiniowania poniższych stwierdzeń.

W procesie transformacji energetycznej harwesting energii powinien odgrywać znaczącą i nieustannie wzrastającą rolę. Małe, lokalne generatory energii użytecznej, wykorzystujące różnorodne naturalne i antropogeniczne źródła energii dotychczas rozpraszanej, mogą w wielu przypadkach zastąpić pobór energii z sieci przesyłowych.

Poszukiwanie nowych źródeł dla procesu harwestingu energii oraz efektywnych metod przetwarzania stanowi ciągle wyzwanie dla zespołów naukowców i inżynierów. Kierunki poszukiwań są oczywiście otwarte, ale warto rozważyć na przykład wykorzystanie infrastruktury przemysłowej i pokopalnianej, składowanych odpadów, turbulencji powietrza i wody czy potencjału biologicznego [55-63].

Liczba publikacji dotyczących problematyki harwestingu energii jest duża, lecz nie zawsze jednak wiąże się to z postępem i rozwojem. W wielu publikacjach prezentowane i badane są od wielu lat wyłącznie prototypy laboratoryjne, nieuwzględniające rzeczywistych problemów aplikacyjnych. Brak jest procesu przejścia do fazy zastosowania i badania harwesterów podczas długotrwałej eksploatacji.

Wielu autorów przedstawia tylko ideę i selektywnie wybrane parametry swoich systemów prototypowych. Brakuje rzetelnego opisu stanowiska i warunków pomiarowych, aparatury czy analizy niepewności. Uniemożliwia to obiektywną ocenę proponowanych rozwiązań i ich potencjalnej przydatności do realnych zastosowań.

W badaniach i publikacjach rzadko spotyka się całościową analizę systemu, uwzględniającą poza aspektem naukowym także czynniki ekonomiczne i eksploatacyjne. Brak jest analizy stosunku nakładów do potencjalnych efektów, problemu niezawodności, bezpieczeństwa, możliwości konserwacji i obsługi, czy rewersu systemu.

Część publikacji przedstawia rozwiązania o charakterze czysto technicznym, niewykazującym nowatorstwa i znaczącego poziomu naukowego. Rozważania teoretyczne dotyczą analizy znanej problematyki, takiej jak na przykład dynamika prostych systemów mechanicznych czy generacja prądu w przetworniku elektrodynamicznym. Pozwala to na wprowadzenie do publikacji równań i ich przekształceń, jednak nie poszerza wiedzy poznawczej.

Wydaje się, że w dążeniu do oryginalności artykułu część autorów wykorzystuje bez uzasadnienia technologie, które są aktualnie „modne”. Na przykład ruch obrotowy przetwarzany jest na energię elektryczną w systemie tryboelektrycznym, choć bardziej efektywny wydaje się konwencjonalny system elektrodynamiczny.

Interesującym kierunkiem rozwoju systemów harwestingu energii jest ich hybrydyzacja. Pozwala to na wzajemne uzupełnianie się systemów energetycznych, wyrównanie poziomu dostarczanej energii w czasie, obniżenie poziomu awaryjności, wydłużenie eksploatacji a często nawet osiągnięcie efektu synergii.

Powyższe uwagi mają charakter subiektywnych spostrzeżeń dotyczących omawianej problematyki. Powstały na bazie wieloletnich doświadczeń oraz kompleksowego przeglądu najnowszej literatury w tej dziedzinie, z której tylko niewielką, reprezentatywną część wykazano w tym artykule. W swojej intencji mają stanowić zaproszenie badaczy do polemiki i wyrażenia własnych poglądów i ocen, a przede wszystkim do poszukiwań nowych źródeł, nowatorskich metod i oryginalnych systemów harwestingu energii. Należy jednak pamiętać, że ciągła generacja i wykorzystanie energii nie może być celem samym w sobie. Racjonalne gospodarowanie energią, a nawet dążenie do obniżenia zużycia tam, gdzie nie jest to niezbędne, wydaje się być obowiązkiem świadomych mieszkańców naszej planety.

Praca zrealizowana i finansowana w ramach Prac Statutowych 2024 Instytutu Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie.

## Literatura

- [1] Tan, Y. K. (Ed.). (2011). *Sustainable energy harvesting technologies: Past, present and future*. BoD—Books on Demand.
- [2] Ligęza, P. (2021). Basic, Advanced, and Sophisticated Approaches to the Current and Forecast Challenges of Wind Energy. *Energies*, 14(23), 8147.
- [3] Energies Special Issue: Development of Energy Harvesting Systems and Methods from Uncommon Sources. [https://www.mdpi.com/journal/energies/special\\_issues/M10987N5RW](https://www.mdpi.com/journal/energies/special_issues/M10987N5RW)
- [4] Oprea, S. V., Băra, A., Uță, A. I., Pirjan, A., & Căruțașu, G. (2018). Analyses of distributed generation and storage effect on the electricity consumption curve in the smart grid context. *Sustainability*, 10(7), 2264.
- [5] Omeiza, L. A., Abid, M., Dhanasekaran, A., Subramanian, Y., Raj, V., Kozak, K., ... & Azad, A. K. (2023). Application of Solar Thermal Collectors for Energy Consumption in Public Buildings—An Updated Technical Review. *Journal of Engineering Research*.
- [6] Sun, M., Zhai, L. F., Li, W. W., & Yu, H. Q. (2016). Harvest and utilization of chemical energy in wastes by microbial fuel cells. *Chemical society reviews*, 45(10), 2847-2870.
- [7] Wang, Z., Huber, C., Hu, J., He, J., Suess, D., & Wang, S. X. (2019). An electrodynamic energy harvester with a 3D printed magnet and optimized topology. *Applied Physics Letters*, 114(1).
- [8] Heydari, S., Fajri, P., Rasheduzzaman, M., & Sabzehgar, R. (2019). Maximizing regenerative braking energy recovery of electric vehicles through dynamic low-speed cutoff point detection. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(1), 262-270.
- [9] Covaci, C., & Gontean, A. (2020). Piezoelectric energy harvesting solutions: A review. *Sensors*, 20(12), 3512.
- [10] Thainirarnit, P., Yingyong, P., & Isarakorn, D. (2020). Impact-driven energy harvesting: Piezoelectric versus triboelectric energy harvesters. *Sensors*, 20(20), 5828.
- [11] Han, C., Wu, G., & Yu, X. B. (2018). Performance analyses of geothermal and geothermoelectric pavement snow melting system. *Journal of Energy Engineering*, 144(6), 04018067.
- [12] Koketsu, K., & Tanzawa, T. (2022). A Design of a Thermoelectric Energy Harvester for Minimizing Sensor Module Cost. *Electronics*, 11(21), 3441.
- [13] Ramya, G., Sivakumar, R., Prabhakar, G., Maheswari, K. U., & Karthi, K. (2021). Architecture of Low Power Energy Harvester Using Hybrid Input Solar, Peltier Thermo Electric and Vibrational Generation. *International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 5(4), 68.
- [14] Thakre, A., Kumar, A., Song, H. C., Jeong, D. Y., & Ryu, J. (2019). Pyroelectric energy conversion and its applications—flexible energy harvesters and sensors. *Sensors*, 19(9), 2170.
- [15] Lopez-Gasso, A., Beriain, A., Solar, H., & Berenguer, R. (2022). Power Management Unit for Solar Energy Harvester Assisted Batteryless Wireless Sensor Node. *Sensors*, 22(20), 7908.
- [16] Cansiz, M., Altinel, D., & Kurt, G. K. (2019). Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review. *Energy*, 174, 292-309.

- [17] Lisowski, A., Klonowski, J., Sypuła, M., Chlebowski, J., Kostyra, K., Nowakowski, T., & Piątek, M. (2019). Energy of feeding and chopping of biomass processing in the working units of forage harvester and energy balance of methane production from selected energy plants species. *Biomass and Bioenergy*, 128, 105301.
- [18] Osorio de la Rosa, E., Vázquez Castillo, J., Carmona Campos, M., Barbosa Pool, G. R., Becerra Nuñez, G., Castillo Atoche, A., & Ortigón Aguilar, J. (2019). Plant microbial fuel cells–based energy harvester system for self-powered IoT applications. *Sensors*, 19(6), 1378.
- [19] Movahedian, Z., & Tavakoli-Anbaran, H. (2023). Exploratory study of betavoltaic nuclear battery using AlN PN junction. *Journal of Energy Storage*, 72, 108485.
- [20] Gogolou, V., Kozalakis, K., Koutroulis, E., Doumenis, G., & Siskos, S. (2021). An Ultra-Low-Power CMOS Supercapacitor Storage Unit for Energy Harvesting Applications. *Electronics*, 10(17), 2097.
- [21] Zhu, B., Liu, J., Yang, C., Qu, W., & Ding, P. (2023). Power Compensation Strategy and Experiment of Large Seedling Tree Planter Based on Energy Storage Flywheel. *Forests*, 14(5), 1039.
- [22] Blakers, A., Stocks, M., Lu, B., & Cheng, C. (2021). A review of pumped hydro energy storage. *Progress in Energy*, 3(2), 022003.
- [23] Garvey, S. D., & Pimm, A. (2022). Compressed air energy storage (CAES). In *Storing Energy* (pp. 117-140). Elsevier.
- [24] Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen as an energy vector. *Renewable and sustainable energy reviews*, 120, 109620.
- [25] Seyedeh Fatemeh Nabavi, Anooshiravan Farshidianfar, Aref Afsharfard, Novel piezoelectric-based ocean wave energy harvesting from offshore buoys, *Applied Ocean Research*, Volume 76, 2018, Pages 174-183
- [26] Qi Xie, Tianming Zhang, Yajia Pan, Zutao Zhang, Yanping Yuan, Yujie Liu, A novel oscillating buoy wave energy harvester based on a spatial double X-shaped mechanism for self-powered sensors in sea-crossing bridges, *Energy Conversion and Management*, Volume 204, 2020, 112286
- [27] Yuhong Xu, Weixiong Yang, Xiaohui Lu, Yanfei Yang, Jianping Li, Jianming Wen, Tinghai Cheng, and Zhong Lin Wang, Triboelectric Nanogenerator for Ocean Wave Graded Energy Harvesting and Condition Monitoring, *ACS Nano* 2021 15 (10), 16368-16375
- [28] Xi Liang, Zhirong Liu, Yawei Feng, Jiajia Han, Linlin Li, Jie An, Pengfei Chen, Tao Jiang, Zhong Lin Wang, Spherical triboelectric nanogenerator based on spring-assisted swing structure for effective water wave energy harvesting, *Nano Energy*, Volume 83, 2021, 105836
- [29] Faria, C.L.; Martins, M.S.; Matos, T.; Lima, R.; Miranda, J.M.; Gonçalves, L.M. Underwater Energy Harvesting to Extend Operation Time of Submersible Sensors. *Sensors* 2022, 22, 1341
- [30] Yang Jie, Xueting Jia, Jingdian Zou, Yandong Chen, Ning Wang, Zhong Lin Wang, Xia Cao, Natural Leaf Made Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Environmental Mechanical Energy, *Adv. Energy Mater.*, 2018, 8, 1703133
- [31] Yange Feng, Liqiang Zhang, Youbin Zheng, Daoai Wang, Feng Zhou, Weimin Liu, Leaves based triboelectric nanogenerator (TENG) and TENG tree for wind energy harvesting, *Nano Energy*, Volume 55, 2019, Pages 260-268
- [32] Maoying Zhou, Qinzong Chen, Zhenlong Xu, Wen Wang; Piezoelectric wind energy harvesting device based on the inverted cantilever beam with leaf-inspired extensions. *AIP Advances* 1 March 2019; 9 (3): 035213
- [33] Viola, F. Comparison Among Different Rainfall Energy Harvesting Structures. *Appl. Sci.* 2018, 8, 955
- [34] Bin Bao, Quan Wang, A rain energy harvester using a self-release tank, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 147, 2021, 107099
- [35] Bolang Cheng, Shaoshuai Niu, Qi Xu, Juan Wen, Suo Bai, Yong Qin, Gridding, Triboelectric Nanogenerator for Raindrop Energy Harvesting, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13, 59975–59982
- [36] Abdelsalam Ahmed, Islam Hassan, Islam M. Mosa, Esraa Elsanadidy, Gayatri S. Phadke, Maher F. El-Kady, James F. Rusling, Ponnambalam Ravi Selvaganapathy, Richard B. Kaner, All printable snow-based triboelectric nanogenerator, *Nano Energy*, Volume 60, 2019, Pages 17-25
- [37] Sayantan Mukherjee, Sayonnil Bhowmick, Ruchira Mukherjee, Harvesting Energy from Thunderstorm, A New Source of Renewable Energy – Review, *Int. J. Adv. Sci. Eng.*, 6, S1, 2019, 64-67
- [38] Catalan, L.; Garacochea, A.; Casi, A.; Araiz, M.; Aranguren, P.; Astrain, D. Experimental Evidence of the Viability of Thermoelectric Generators to Power Volcanic Monitoring Stations. *Sensors* 2020, 20, 4839
- [39] Peters N. L., Oppenheimer C., Jones B., Rose M., Kyle P., Harnessing Erebus volcano’s thermal energy to power year-round monitoring, *Antarctic Science* 33(1), 2021, 73–80
- [40] Loreti, P.; Catini, A.; De Luca, M.; Bracciale, L.; Gentile, G.; Di Natale, C. The Design of an Energy Harvesting Wireless Sensor Node for Tracking Pink Iguanas. *Sensors* 2019, 19, 985
- [41] Hexiang Zhang, Xiaoping Wu, Yajia Pan, Ali Azam, Zutao Zhang, A novel vibration energy harvester based on eccentric semicircular rotor for self-powered applications in wildlife monitoring, *Energy Conversion and Management*, Volume 247, 2021, 114674

- [42] Wang, X., Shi, Y., Yang, P., Tao, X., Li, S., Lei, R., Liu, Z., Wang, Z. L., Chen, X., Fish-Wearable Data Snooping Platform for Underwater Energy Harvesting and Fish Behavior Monitoring. *Small* 2022, 18, 2107232
- [43] Cheng Yan, Yuyu Gao, Shenlong Zhao, Songlin Zhang, Yihao Zhou, Weili Deng, Ziwei Li, Gang Jiang, Long Jin, Guo Tian, Tao Yang, Xiang Chu, Da Xiong, Zixing Wang, Yongzhong Li, Weiqing Yang, Jun Chen, A linear-to-rotary hybrid nanogenerator for high-performance wearable biomechanical energy harvesting, *Nano Energy*, Volume 67, 2020, 104235
- [44] Anja Lund, Yuan Tian, Sozan Darabi, Christian Müller, A polymer-based textile thermoelectric generator for wearable energy harvesting, *Journal of Power Sources*, Volume 480, 2020, 228836
- [45] Ayesha Sultana, Md. Meheeb Alam, Tapas Ranjan Middy, Dipankar Mandal, A pyroelectric generator as a self-powered temperature sensor for sustainable thermal energy harvesting from waste heat and human body heat, *Applied Energy*, Volume 221, 2018, Pages 299-307
- [46] Rajib Mondal, Md Al Mahadi Hasan, Jeong Min Baik, Ya Yang, Advanced pyroelectric materials for energy harvesting and sensing applications, *Materials Today*, Volume 66, 2023, Pages 273-301
- [47] Yu Pan, Teng Lin, Feng Qian, Cheng Liu, Jie Yu, Jianyong Zuo, Lei Zuo, Modeling and field-test of a compact electromagnetic energy harvester for railroad transportation, *Applied Energy*, Volume 247, 2019, Pages 309-321
- [48] Hao Wang, Minyi Yi, Xiaohui Zeng, Tingsheng Zhang, Dabing Luo, Zutao Zhang, A hybrid, self-adapting drag-lift conversion wind energy harvesting system for railway turnout monitoring on the Tibetan Plateau, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 46, 2021, 101262
- [49] Muhammad Iqbal, Farid Ullah Khan, Hybrid vibration and wind energy harvesting using combined piezoelectric and electromagnetic conversion for bridge health monitoring applications, *Energy Conversion and Management*, Volume 172, 2018, Pages 611-618
- [50] Paul Cahill, Budhaditya Hazra, Raid Karoumi, Alan Mathewson, Vikram Pakrashi, Vibration energy harvesting based monitoring of an operational bridge undergoing forced vibration and train passage, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 106, 2018, Pages 265-283
- [51] Hongye Pan, Hai Li, Tingsheng Zhang, Asif Ali Laghari, Zutao Zhang, Yanping Yuan, Bin Qian, A portable renewable wind energy harvesting system integrated S-rotor and H-rotor for self-powered applications in high-speed railway tunnels, *Energy Conversion and Management*, Volume 196, 2019, Pages 56-68
- [52] Zhuojun Jiang, Changyuan Jia, Peng Zheng, Yuchen Gong, Ning Li, Ammar Ahmed, Zutao Zhang, Dabing Luo, A transverse deceleration energy harvester based on a sliding plate for self-powered applications in near-zero energy road tunnels, *Sustainable Cities and Society*, Volume 84, 2022, 104014
- [53] Dan Li, Man Hu, Fei Wu, Keling Liu, Mingyuan Gao, Zegang Ju, Jiang Zhao, Anhong Bao, Design of tunable low-frequency acoustic energy harvesting barrier for subway tunnel based on an optimized Helmholtz resonator and a PZT circular plate, *Energy Reports*, Volume 8, 2022, Pages 8108-8123
- [54] Hartwick, V.L., Toon, O.B., Lundquist, J.K. *et al.* Assessment of wind energy resource potential for future human missions to Mars. *Nat Astron* 7, 2023, 298–308
- [55] Ligęza, P., Jamróz, P., & Ostrogórski, P. (2020). Methods for dynamic behavior improvement of tachometric and thermal anemometers by active control. *Measurement*, 166, 108147.
- [56] Ligęza, P. (2020). Modification of hot-wire anemometers frequency bandwidth measurement method. *Sensors*, 20(6), 1595.
- [57] Ligęza, P., Jamróz, P., & Ostrogórski, P. (2021). Reduction of electromagnetic interferences in measurements of fast-changing air velocity fluctuations by means of hot-wire anemometer. *Flow Measurement and Instrumentation*, 79, 101945.
- [58] Ligęza, P., & Jamróz, P. (2022). A Hot-Wire Anemometer with Automatically Adjusted Dynamic Properties for Wind Energy Spectrum Analysis. *Energies*, 15(13), 4618.
- [59] Ligęza, P. (2022). Dynamic error correction method in tachometric anemometers for measurements of wind energy. *Energies*, 15(11), 4132.
- [60] Ligęza, P. (2022). Method of testing fast-changing and pulsating flows by means of a hot-wire anemometer with simultaneous measurement of voltage and current of the sensor. *Measurement*, 187, 110291.
- [61] Ligęza, P. (2023). Reconstructing the trajectory of the object's motion on the basis of measuring the components of its velocity. *Measurement*, 221, 113546.
- [62] Jamróz P., Socha K.: Monitoring of the Rock Mass Moisture in the Crystal Caves Nature Reserve; *Archives of Mining Sciences* (2022 ), vol. 67, No 4, 729-742, DOI: 10.24425/ams.2022.143684
- [63] Ostrogórski P., Skotniczny P., Pucka M.: Measurements of the Methane Concentration Along the Longwall Excavations and Longwall; *Archives of Mining Sciences* (2022), vol. 67, No 1, 195-204. DOI: <https://doi.org/10.24425/ams.2022.140861>

## **Review of various sources for obtaining energy in the harvesting process**

### **Abstract**

Energy transformation requires replacing power plants based on fossil fuels with renewable energy. Energy harvesting plays an important, although not fully appreciated role here. Distributed, local power supply systems for small receivers, based on various sources of previously dispersed energy, can contribute to changing the current energy paradigm. The article presents an overview of energy harvesting technologies and diverse energy sources used in this process. Particular attention is paid to sources of a less conventional nature. The aim of the article is to encourage and direct scientists with the potential to explore this subject to search for new, previously unexploited energy sources and innovative and effective methods of obtaining useful energy in the harvesting process.

**Keywords:** energy harvesting, local energy sources, energy conversion, distributed energy, renewable energy