

# ZAGADNIENIE KOGENERACJI ENERGII WYKORZYSTUJĄCEJ GENERATORY TERMoelektryczne

ADRIAN CHMIELEWSKI<sup>1</sup>, KAMIL LUBIKOWSKI<sup>2</sup>, STANISŁAW RADKOWSKI<sup>3</sup>, MICHAŁ WIKARY<sup>4</sup>,  
JĘDRZEJ MAĆZAK<sup>5</sup>

Politechnika Warszawska

## Streszczenie

Rozwój technologii odnawialnych źródeł energii i polityka energetyczna kładą nacisk na systemy kogeneracji energii. W przemyśle samochodowym inwestuje się w rozwój pomp ciepłych, silników Stirlinga, akumulatorów energii, turbin gazowych, mat, zawieszek i wyciszeń piezoelektrycznych, silników liniowych oraz innych systemów odzyskiwania energii, która, wydalana w procesie spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w konwencjonalnych silnikach spalinowych [1,2], jest bezpowrotnie tracona. Systemy kogeneracyjne zwiększają efektywność wykorzystania energii zawartej w mieszance paliwowo-powietrznej. Aktualnie istnieje tendencja do łączenia systemów mikrokogeneracji energii wraz z innymi systemami istniejącymi w pojeździe, np. systemami sterowania silnikiem, zasilania silnika, systemami bezpieczeństwa itp. [3-8]. Do jednego z takich sposobów należy odzysk energii cieplnej dzięki termoelektrycznym generatorom (TEG – z ang. thermoelectric generators) wykorzystującym zjawisko Seebecka.

**Słowa kluczowe:** kogeneracja energii, termoelektryczne generatory, zjawisko Seebecka, silnik Stirlinga

## 1. Wstęp

W artykule przedstawiono zagadnienie kogeneracji energii z ciepła dyssypowanego w układzie wydechowym silnika spalinowego przy wykorzystaniu generatorów termoelektrycznych, potocznie zwanych „Ogniwiemi Peltiera” [9]. W publikacji przedstawiono wyniki analiz i symulacji komputerowych zjawisk termoelektrycznych zachodzących w modułach Peltiera. Następnie wyniki analiz komputerowych przeprowadzonych w programie ANSYS porównano z wynikami obliczeniowymi z przyjętego modelu matematycznego oraz wynikami z badań stanowiskowych. Badania laboratoryjne przeprowadzono w Zintegrowanym Środowisku

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, email: a.chmielewski@mechatronika.net.pl, tel. 22 234 81 18

<sup>2</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, email: k.lubikowski@mechatronika.net.pl, tel. 22 234 81 18

<sup>3</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, email: ras@mechatronika.net.pl, tel. 22 234 81 18

<sup>4</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, email: m.wikary@mechatronika.net.pl, tel. 22 234 81 18

<sup>5</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, email: jma@mechatronika.net.pl, tel. 22 234 81 18

Laboratorium Systemów Mechatronicznych Pojazdów i Maszyn Roboczych na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej, mieszczącym się przy ulicy Narbutta 84 w Warszawie.

Należy wspomnieć, że w laboratorium w badaniach zagadnień dotyczących procesu kogeneracji energii wykorzystywane są: piezoelektryki, silnik Stirlinga a ostatnio silnik termo-akustyczny.

Polityka energetyczna Komisji Europejskiej ma na celu zmniejszenie uzależnienia krajów UE od importowanej ropy naftowej i wytworzenia własnych lokalnych nośników energii, którymi mogą być biopaliwa [1]. W kwestiach technologii odnawialnych i polityki energetycznej kładziony jest nacisk na systemy kogeneracji energii. W dyrektywie 2009/28/WE z kwietnia 2009 roku wyraźnie określono wymagania stawiane państwu członkowskiemu Unii Europejskiej w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych. Inwestuje się w rozwój pomp ciepłych, silników Stirlinga[2], akumulatorów energii, turbin gazowych w przemyśle samochodowym oraz systemów odzysku energii wydalanej w procesie spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w konwencjonalnych silnikach spalinowych [9]. Jednym z takich sposobów jest odzyskiwanie energii cieplnej dzięki termoelektrycznym generatorom (TEG) [10-12] wykorzystującym zjawisko Seebecka.

Przeprowadzając prace naukowo-badawcze na termoelektrycznych generatorach, jako przetwornikach energii, opracowano parametry pracy termoelektrycznych generatorów w sytuacji odzyskiwania energii elektrycznej z energii cieplnej dyssypowanej w silniku spalinowym w układzie wydechowym.

Do zamodelowania i przeprowadzenia symulacji komputerowych wykorzystano środowisko elementów skończonych (MES) [13-14].

W opisie matematycznym ośrodka ciągłego obiekt jest traktowany jako model w przestrzeni euklidesowskiej, którego punkty identyfikuje się z materialnymi cząstkami ciała. Ciągłość [15] zostaje zamodelowana w sposób matematyczny, przy czym zakłada się ciągłość występujących w teorii funkcji z dopuszczalnym wyjątkiem na ograniczonej liczbie wewnętrznych powierzchni nieciągłości, oddzielających obszary ciągłe.

W stosunku do modeli ciągłych, modele dyskretne umożliwiają modelowanie nieciągłości i rozdrobnienia materiału poprzez podejście do modelu jako złożenia skończonej liczby obiektów dyskretnych. Obecnie modele dyskretne można budować na różnych poziomach obserwacji (makro/mikro/nano) z punktu widzenia struktury materiału.

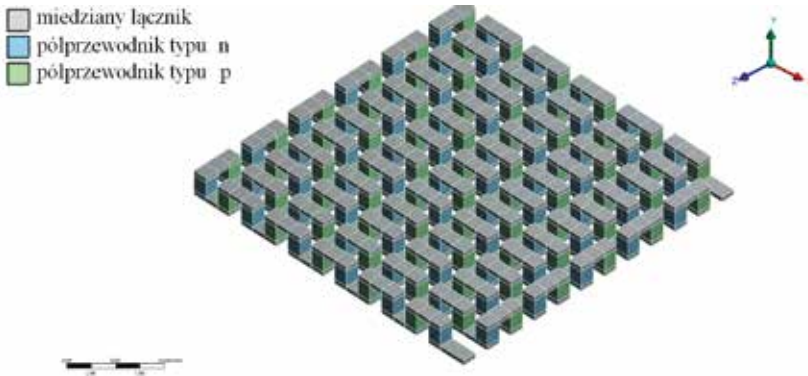
## 2. Analiza termogeneratora elektrycznego (stan ustalony)

Głównym zadaniem doświadczenia jest przeanalizowanie komercyjnego modułu Peltiera, wykorzystując metodę elementów skończonych, następnie porównanie z modelem matematycznym, wynikami empirycznymi oraz komercyjnymi parametrami modułu.

Typowym zadaniem termogeneratorów (z komercyjnego punktu widzenia), z którym można się obecnie spotkać, jest wygenerowanie i utrzymanie wymaganej temperatury

na odpowiednim poziomie (ujemnej lub dodatniej), za pomocą dostarczanej energii elektrycznej do układu. Na potrzeby analizy, proces został odwrócony, dostarczając strumień energii cieplnej, w skutek czego obserwowano gromadzone wartości energii elektrycznej na końcówkach termoelektrycznego generatora.

Model zawiera 142 elementy półprzewodnikowe typu p i typu n, co tworzy 71 par p-n. Obiekty półprzewodnikowe są ze sobą połączone za pomocą cienkich miedzianych łączników, tak jak to zostało przedstawione na rysunku 1. Model nie zawiera kontaktów, co oznacza, że nie tworzy dodatkowych więzów. Płytki ceramiczne nie zostały zamodelowane.



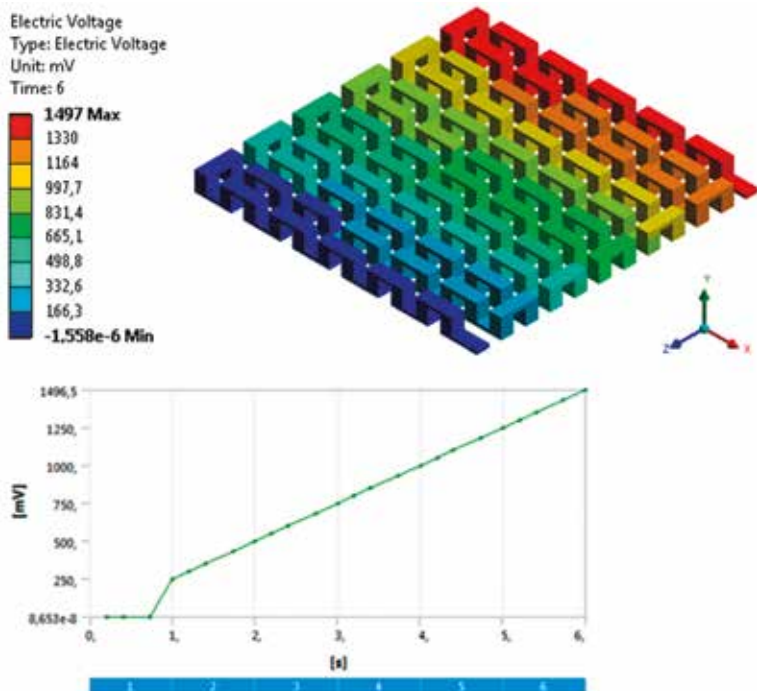
Rys. 1. Model geometryczny

### 3. Wyniki

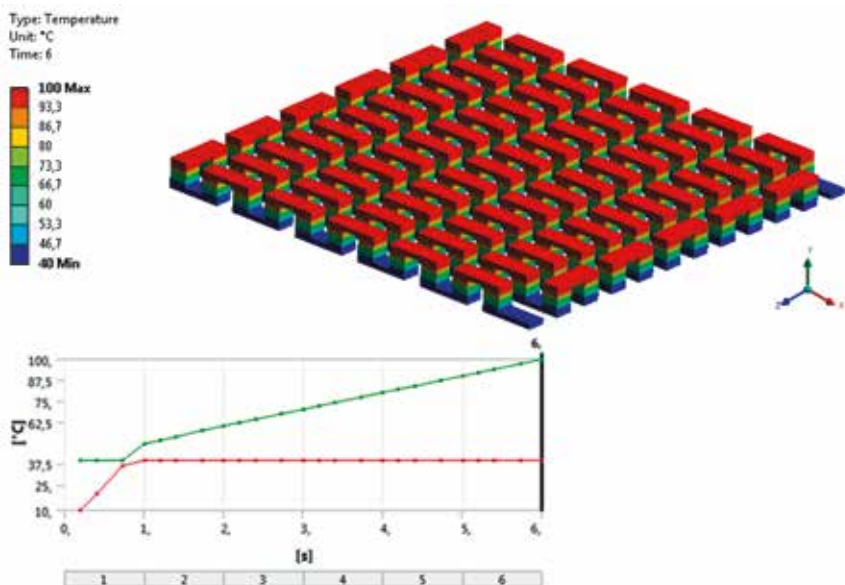
W tej części publikacji przedstawiono wyniki analiz wcześniej omówionego modelu. Na rysunku 2 przedstawiono wartości napięć odzyskiwanej energii (oraz jego rozkład) w ostatnim kroku analizy (dla różnicy temperatur 60°C). Maksymalna wartość, jaka została zanotowana, wynosi **1.497 V**. Napięcia, które zostały uzyskane podczas „n” kroków przedstawia tabela nr 1.

Tabela 1. Wartości napięć

Czas [s]	Max. [mV]	Czas [s]	Max. [mV]
0,2	7,79E-07	3,2	798,14
0,4	5,19E-07	3,4	848,03
0,73333	8,65E-08	3,7333	931,17
1	249,42	4	997,68
1,2	299,3	4,2	1047,6
1,4	349,19	4,4	1097,4
1,7333	432,33	4,7333	1180,6
2	498,84	5	1247,1
2,2	548,72	5,2	1297
2,4	598,61	5,4	1346,9
2,7333	681,75	5,7333	1430
3	748,26	6	1496,5



Rys. 2. Rozkład napięcia



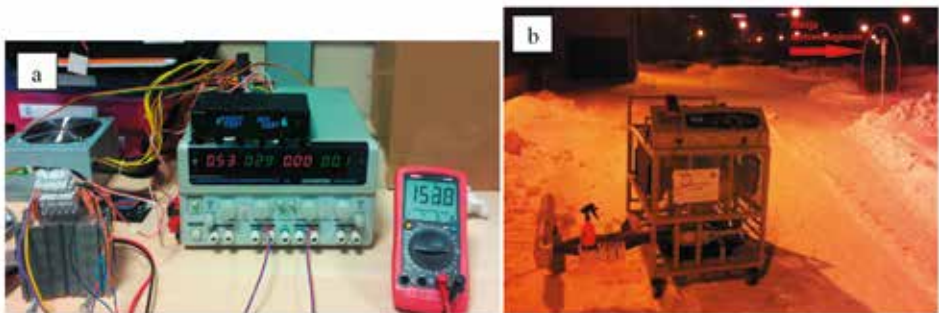
Rys. 3. Rozkład temperatury. Liniją czerwoną przedstawiono zasymulowaną temperaturę po stronie zimnej TEG, natomiast liniją zieloną przedstawiono temperaturę po stronie ogrzewanej TEG

Na sąsiedniej stronie, na rysunku 3, przedstawiono rozkład temperatury w złączach półprzewodnikowych w zamodelowanym TEG.

**Tabela 2. Wartości temperatur**

Czas [s]	Min [°C]	Max [°C]	Czas [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
0,2	10	40	3,2	40	72
0,4	20	40	3,4	40	74
0,73333	36,667	40	3,7333	40	77,333
1	40	50	4	40	80
1,2	40	52	4,2	40	82
1,4	40	54	4,4	40	84
1,7333	40	57,333	4,7333	40	87,333
2	40	60	5	40	90
2,2	40	62	5,2	40	92
2,4	40	64	5,4	40	94
2,7333	40	67,333	5,7333	40	97,333
3	40	70	6	40	100

Wyniki analiz komputerowych porównano z wynikami z badań laboratoryjnych. Wyniki te prezentowano już na różnych konferencjach naukowych oraz sympozjach [1,5]. Na rysunku poniżej przedstawiono zdjęcia ze stanowisk, na których przeprowadzano badania.



**Rys. 4. Badania stanowiskowe TEG: a) Stanowisko do badań właściwości TEG, b) Stanowisko do badań TEG na silniku ECOTEC X18XE**

Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowiskach laboratoryjnych na wydziale SiMR PW w Zintegrowanym Środowiskowym Laboratorium Systemów Mechatronicznych Pojazdów i Maszyn Roboczych w dwóch etapach. Najpierw badano właściwości TEG, grzejąc i chłodząc strony ogniwa i szcztując z aparatury pomiarowej wartości opisujące energię elektryczną czyli napięcie, prąd i moc elektryczną. Następnie dokonano pomiarów

na stanowisku rzeczywistym, zarówno w temperaturze pokojowej (warunki panujące w laboratorium), jak i w temperaturze otoczenia w trakcie zimy, wynoszącej  $-12^{\circ}\text{C}$ . Na stanowisku zbudowanym na silniku benzynowym ECOTEC X18XE, przebudowując jego układ odprowadzania spalin. Początkowo wykonano pomiary temperatury na powierzchni tego układu w celu określenia odpowiedniego miejsca do montażu TEG. W miejscu, które wybrano, rozdzielono układ i wmontowano podwójną rurę o przekroju prostokątnym, aby łatwo móc zamontować TEG, wykorzystując całą ich powierzchnię. Dodatkowo układ z rurą prostokątną posiadał kierownicę strumienia gazów spalinowych. W momencie dostarczania energii do TEG kierowano strumień spalin na tę część rury, na której były zamontowane TEGi. W momencie granicznym przekroczenia temperatur, które mogłyby uszkodzić półprzewodnikową strukturę, strumień gazów kierowano do rury swobodnej (bajpasu bez TEG-ów).

Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli nr 3.

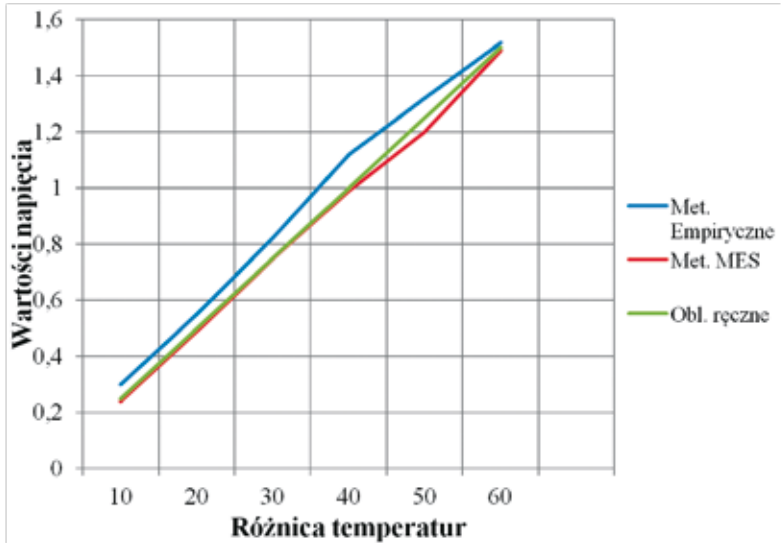
**Tabela 3. Porównanie odzyskanej energii w różnych warunkach otoczenia[5]**

	W temp. +28 [°C]		W temp. -12 [°C]	
	800 [rpm]	2000 [rpm]	800 [rpm]	2000 [rpm]
Bez przepływu spalin	1,4 [V]	2,5 [V]	0,9 [V]	1,44 [V]
Z przepływem spalin	1,9 [V]	3,15 [V]	1,14 [V]	2,24 [V]

Ostatecznie wyniki z badań porównano z wynikami symulacji komputerowych oraz obliczeń modelowych. Wyniki porównania przedstawiono poniżej, na rysunku nr 5 oraz zebrano w tabeli 4.

**Tabela 4. Porównanie wartości napięcia energii elektrycznej z pomiarów laboratoryjnych (pierwsza kolumna), z symulacji MES (środkowa kolumna) oraz z obliczeń matematycznych (kolumna z prawej strony)**

C - strona zimna	H - strona gorąca	$\Delta T$ - różnica temperatury	U - napięcie	U - napięcie	U - napięcie
Temp (°C)	Temp (°C)	-	Nap(V), empir.	Nap(V), MES	Nap(V), obl. ręczn.
40	50	10	0,3	0,24	0,25
40	60	20	0,55	0,49	0,5
40	70	30	0,82	0,748	0,75
40	80	40	1,12	0,99	1
40	90	50	1,32	1,2	1,25
40	100	60	1,52	1,49	1,5



Rys. 5. Charakterystyki odzysku energii TEG

## 5. Wnioski

Wykonana praca badawcza pozwoliła stwierdzić, że mimo małej sprawności TEG, nadają się one doskonale jako elementy pasywne odzyskujące energię bezpowrotnie dyssypowaną w układzie wylotowym silnika spalinowego. Następnie stwierdzono, że wykorzystanie TEG w układzie odprowadzania spalin wymaga przygotowania powierzchni, musi być ona płaska (większość pojazdów poruszających się po drogach wyposażona jest w układy wydechowe o przekroju kołowym), odpowiednio wyczyszczona z zanieczyszczeń.

Ponadto wykonano badania zwiększonej ilości generatorów. TEG powinno się montować pakietami, łącząc je szeregowo a także równolegle. Każdy odzyskany wat oznacza oszczędność oraz lepsze wykorzystanie traconej energii w postaci odprowadzanych do otoczenia dżuli.

W przyszłości planowana jest budowa kompleksowego stanowiska do odzysku energii na Wydziale SiMR PW. Przewiduje się zabudowanie chłodnicy płytkami Peltiera, montaż TEG na pokrywie zaworów silnika oraz zabudowanie układu wydechowego wysokotemperaturowymi ogniwami TEG.

## Bibliografia

- [1] Lubikowski K., Radkowski S., Szczurowski K., Wikary M.: *Analysis of possibility of use Peltier module In task of energy scavenging*, Key Engineering Materials, Vol. 588, 2014, pp. 1-11.
- [2] Chmielewski A., Gumiński R., Lubikowski K., Radkowski S., Szulim P.: *Bench testing and simulation model of a cogeneration system with a Stirling engine*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 20, No. 3, 2013, s. 97-104.
- [3] Wierzbicki S.: *Laboratory Control and Measurement System of a Dual-Fuel Compression Ignition Combustion Engine Operating in a Cogeneration System*. Solid State Phenomena Vol. 210 (2014), 200–205. Priya S, Inman D. J., „Energy Harvesting Technologies”, Springer, ISBN 978-0-387-76463-4.
- [4] Wierzbicki S., Śmieja M. :*Visualization of the Paramters and Changes of Signals Controlling the Operation of Common Rail Injectors*. Solid State Phenomena Vol. 210 (2014), s. 136–141.
- [5] Śmieja M. & Wierzbicki S.: *Influence of content of methane in biogas on emission of toxic substances in diesel engine supplied with bifuel*. International Conference on Environmental Engineering (2014).
- [6] Śmieja M., Wierzbicki S., Mamala J.: *Sterowanie dawką wtryskiwanego paliwa w układzie Common Rail z wykorzystaniem środowiska LabView*. Combustion Engines 123 CD (2013).
- [7] Wierzbicki S., Śmieja M. , Grzeszczyk R.: *Zintegrowane sterowanie stanowiskiem badawczym silników o ZS w środowisku fast prototyping*. Combustion Engines 123 CD (2013).
- [8] Śmieja M. & Wierzbicki S. :*The concept of an integrated laboratory control system for a dual - fuel diesel engine*. Journal of KONES Vol. 19, No. 3, 451–458 (2012).
- [9] Kumar C. R., Sonthalia A., Goel R.: *Experimental study on waste heat recovery from an internal combustion engine Rusing thermoelectric technology*, Thermal Science, 2011, Vol. 15, No. 4, s. 1011-1022.
- [10] Chmielewski A., Lubikowski K., Radkowski S., Szczurowski K.: *Research and simulation work of TEG in cogeneration task of the exhaust system*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 20, No. 2, 2013, s. 41-47.
- [11] Wojciechowski K., Merkisz J., Fuć P., Lijewski P., Schmidt M., Zybala R.: *Study of recovery of waste heat from exhaust of automotive engine*, 5th European Conference on Thermoelectrics, Odessa, Ukraine, September 10-12, 2007, s. 194-198.
- [12] Antonova E.E., David C.: *Finite Elements of Thermoelectric Device Analysis In ANSYS*, Looman ANSYS Inc, ANSYS Release 9.0 Documentation, 2004.
- [13] Angrist S. W.: *Direct Energy Conversion*, 3<sup>rd</sup> Edition, Allyn and Bacon, Boston, 1976, s. 140-166.
- [14] Silvester P.P., Ferrari R.L.: *Finite Elements for Electrical Engineers*, 3<sup>rd</sup> Edition, University Press, Cambridge, 1996.
- [15] Landau L.D., Lifshitz E.M.: *Electrodynamics of Continuous Media*, 2<sup>nd</sup> Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1984.
- [16] Chmielewski A.: *Modelowanie procesu kogeneracji energii z wykorzystaniem badań stanowiskowych na silniku Stirlinga*, Praca Magisterska, Warszawa 2013.

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego: N N509 520940 pt: „Kogeneracyjne zwiększenie efektywności energetycznej wielopaliwowego silnika spalinowego z wykorzystaniem kryteriów minimalizacji aktywności wibroakustycznej i zagrożeń środowiskowych” – projekt finansowany przez Narodowe Centrum Nauki.