

## Prototyp metamateriałowego systemu harwestera mikrofalowego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono weryfikację potencjału autorskiej macierzy metamateriałowej (MM) stanowiącej część większego systemu harwestera promieniowania elektromagnetycznego (EM) do pozyskiwania energii EM z otoczenia w zakresie częstotliwości mikrofalowych. Motywacją do podjęcia tej tematyki jest szybki rozwój małych przenośnych urządzeń elektronicznych o małym zapotrzebowaniu energetycznym. Głównym celem pracy jest ocena efektywności energetycznej systemu prototypu harwestera EM składającego się z autorskiej macierzy MM i konwertera RF/DC. Zadaniem konwertera RF/DC jest przetwarzanie energii EM pozyskanej z otoczenia przez macierz MM na energię elektryczną. Działanie prototypu harwestera EM zostało zweryfikowane eksperymentalnie. Oceniono efektywność prototypu i jego potencjalne zastosowanie w technologii pozyskiwania energii z otoczenia. Efektywność pozyskiwania energii EM prototypu wyniosła ok. 50% przy częstotliwości mikrofalowej ok. 2,6 GHz. Otrzymane wyniki potwierdziły możliwości aplikacyjne zaproponowanego prototypu harwestera EM.

**Abstract.** This work verified the potential of an original metamaterial (MM) array as part of an electromagnetic radiation (EM) harvesting system for EM energy capturing in the microwave frequency range from the environment. The motivation for this research is the rapid development of small portable electronic devices with low energy demand. The main goal of the research is evaluation the effectiveness of the prototype EM harvester system, which consists of the original MM array and an RF/DC converter. The task of the RF/DC converter is to convert the EM energy harvested from the environment by the MM array into electrical energy. The operation of the EM harvester prototype was experimentally verified. The efficiency of the prototype and its potential application in the energy harvesting technology were evaluated. The energy harvesting efficiency of the prototype EM was approximately 50% at a microwave frequency around 2.6 GHz. The obtained results showed the attractiveness of the proposed EM harvester prototype. (**Prototype of a metamaterial microwave harvesting system**)

**Słowa kluczowe:** absorber metamateriałowy, pozyskiwanie energii, harvester EM, RF/DC konwerter

**Keywords:** metamaterial absorber, energy harvesting, EM harvester, RF/DC converter

### Wstęp

Rosnąca liczba małych przenośnych urządzeń elektronicznych powoduje wzrost zapotrzebowania na nowe sposoby ich zasilania w energię elektryczną. Choć pojedyncze małe urządzenia elektroniczne mają relatywnie niskie zapotrzebowanie na energię, dynamiczny wzrost ich ilości wymaga poszukiwania nowych alternatywnych źródeł energii do ich zasilania. Odpowiedzią na to zapotrzebowanie jest technologia bezprzewodowego transferu energii (WPT), z pomocą której możliwe jest pozyskiwanie i przetwarzanie różnych form energii obecnych w otoczeniu (energia słoneczna i ciepła, energia kinetyczna, energia fal akustycznych oraz energia fal elektromagnetycznych (EM)) [1]. Środowiskowymi źródłami energii mogą być urządzenia i systemy nadawcze i odbiorcze wykorzystujące promieniowanie EM do komunikacji, takie jak telefony komórkowe, anteny systemu GSM, routery WiFi, słuchawki Bluetooth i inne. Oczekuje się, że w erze rozwoju Internetu Rzeczy (IoT) i inteligentnych miast obecność energii fal radiowych (RF) i mikrofalowych (MW) generowanych w otoczeniu w szerokim zakresie częstotliwości stanie się powszechna, a urządzenia o niskim zapotrzebowaniu energetycznym będą mogły bezprzewodowo (w technologii WPT) pozyskiwać energię RF i MW w sposób ciągły [2].

W związku z powyższym w ostatnich latach wzrosło zainteresowanie nowymi materiałami o wysokiej efektywności absorpcji promieniowania EM pod kątem możliwości ich zastosowania do pozyskiwania (harwestowania) energii ze środowiska elektromagnetycznego. Badania nad nowymi materiałami absorpcyjnymi skupiają się m.in. na metamateriałach (MM) EM, których niekonwencjonalne właściwości EM stanowią atrakcyjną alternatywę dla istniejących rozwiązań o mniejszej efektywności, bazujących na tzw. antenach prostowniczych (rectennas) [3-6].

Właściwości EM struktur MM zależą od ich kształtu, parametrów materiałowych, częstotliwości promieniowania padającego oraz stosunku wymiaru charakterystycznego pojedynczej komórki MM do długości padającej fali EM.

Metamateriały mogą m.in. niekonwencjonalnie blokować, absorbować lub załamywać fale elektromagnetyczne, stając się materiałem o szerokim potencjale aplikacyjnym w różnych dziedzinach nauki i technologii [7]. W tab. 1 przedstawione jest zapotrzebowanie na energię, moc popularnych małych urządzeń elektronicznych.

Tabela 1. Zapotrzebowanie na energię popularnych małych urządzeń elektronicznych [8]

Urządzenie	Moc
Odbiornik GSM, LCD	100 mW
Odbiornik Bluetooth, Wifi	10 mW
Odbiornik RF, GPS	1 mW
System RFID	10 $\mu$ W
Zegarek, kalkulator	1 $\mu$ W

Ze względu na swoje właściwości, metamateriały EM dzielimy na rezonansowe i nierezonansowe. Metamateriały rezonansowe zazwyczaj składają się z metalowych ścieżek ze szczelinami. Ich właściwości wynikają głównie z makroskopowej interakcji układu ścieżek i szczelin z padającym promieniowaniem EM. Z kolei właściwości metamateriałów nierezonansowych wynikają z interakcji ich mikroskopowej struktury z padającym promieniowaniem EM. Metamateriały rezonansowe stanowią najpopularniejszą grupę metamateriałów [7].

Działanie struktury metamateriałowej opiera się na rezonansie elektromagnetycznym obwodu LC utworzonego przez pojemności szczelin i indukcyjności metalowych ścieżek. Podczas oddziaływania struktury MM z padającym promieniowaniem EM w obszarze szczeliny gromadzi się jak w kondensatorze ładunek elektryczny o przeciwnej polaryzacji. Ładunek ten może być wykorzystany w formie napięcia, jeżeli umieści się w niej obciążenie, np. rezystor. Napięcie elektryczne uzyskane w ten sposób może być użyte do zasilania małych urządzeń o niskim zapotrzebowaniu energetycznym np. odbiorników GPS i RF, aparatów słuchowych, systemów RFID itp. [9, 10]

Wykorzystanie metamateriałów w systemach pozyskiwania energii EM jest przedmiotem wielu badań [11-14]. Ich niezaprzeczalne zalety, m.in. niskie koszty

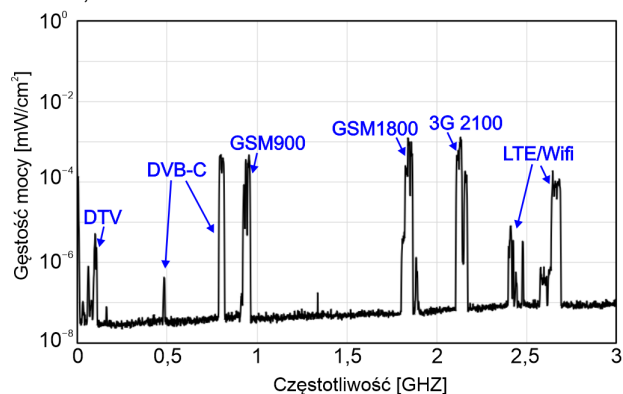
produkcji, prosta konstrukcja i dostępność materiałów używanych do ich produkcji, sprawiają, że są one atrakcyjne do badań z szerokim potencjałem aplikacyjnym. Chociaż niektóre znane struktury MM wykazują wysoką efektywność absorpcji promieniowania EM (na poziomie około 80% [15-17]), prowadzone są nadal badania nad nowymi strukturami metamateriałów. Aktualnym wyzwaniem, przed którym stoi technologia pozyskiwania energii przez struktury MM jest niezadowalająca efektywność konwersji pozyskanej energii EM z otoczenia na energię elektryczną przez konwertery RF/DC (mniej niż 50% [18, 19]). Osiągnięcie jak największej efektywności konwersji energii EM na energię elektryczną przełoży się na szersze zastosowania struktur metamateriałowych.

W niniejszej pracy prezentujemy prototyp harwestera energii EM składającego się z autorskiej macierzy MM i konwertera RF/DC. Celem wykonanych przez nas badań było sprawdzenie, czy proponowany prototyp nadaje się do pozyskiwania energii EM w zakresie częstotliwości mikrofalowych. Przy opracowaniu proponowanej macierzy MM skorzystaliśmy z doświadczeń badanych struktur MM zaprezentowanych w pracach [20-23]. W powyższych publikacjach przebadaliśmy właściwości absorpcyjne w zakresie mikrofalowym kilku rodzajów przypadków macierzy MM. Zbudowany przez nas prototyp harwestera EM został przebadany pod kątem absorpcji promieniowania EM w zakresie mikrofalowym (2 GHz- 3 GHz) i efektywności konwersji energii EM na energię elektryczną.

### Miejskie środowisko EM

Aby ocenić zasoby energetyczne i zidentyfikować najkorzystniejszy zakres częstotliwości do zastosowań w pozyskiwaniu energii fal EM, wykonano badania w typowym środowisku miejskim (kampus Uniwersytetu Morskiego w Gdyni), mające na celu zbadanie widma częstotliwości gęstości mocy mikrofalowej (uśrednionej przez okres 20 minut).

Rys.1 przedstawia rozkład mocy widmowej pola EM w zależności od częstotliwości na terenie kampusu Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Z przedstawionego widma wynika, że w tym środowisku największe wartości mocy pola EM odpowiadają częstotliwościom używanym przez systemy komunikacji bezprzewodowej, takie jak DTV, DVB-C, GSM oraz LTE/WiFi.



Rys.1. Rozkład mocy widmowej pola EM (uśrednionej przez 20 minut) w zależności od częstotliwości w środowisku miejskim, na terenie kampusu Uniwersytetu Morskiego w Gdyni

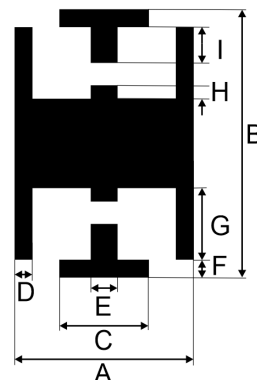
### Struktura macierzy MM

Mozaika i wymiary macierzy MM zostały dobrane na podstawie otrzymanej charakterystyki gęstości mocy widmowej miejskiego środowiska EM. Macierz MM zaprojektowano tak, aby jej rezonans EM występował na częstotliwości w paśmie 2,6 GHz, odpowiadającym komunikacji bezprzewodowej LTE/WiFi.

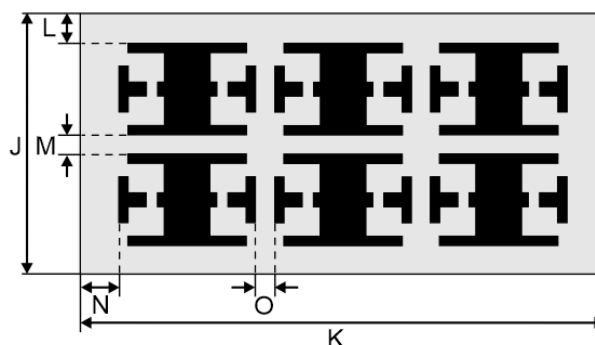
Macierz MM, o wymiarach 2 x 3 składa się z 6 pojedynczych komórek MM (rys. 2) ułożonych w dwóch rzędach i trzech kolumnach (rys. 3). Pojedyncze komórki MM składają się z miedzianych ścieżek o grubości 35 μm, wytrawionych na warstwie dielektrycznej (FR-4). Za warstwą dielektryka znajduje się warstwa miedzi o grubości 35 μm pełniąca funkcję ekranu EM.

Mozaikowa geometria miedzianych ścieżek w pojedynczej komórce MM (rys. 2) umożliwia praktycznie dowolną zmianę jej częstotliwości rezonansowej. Zmianę tę można zrealizować m.in. poprzez modyfikację wymiarów długości, szerokości oraz odległości między poszczególnymi ścieżkami.

Wymiary macierzy MM oraz pojedynczej komórki MM zostały zestawione w Tab. 2.

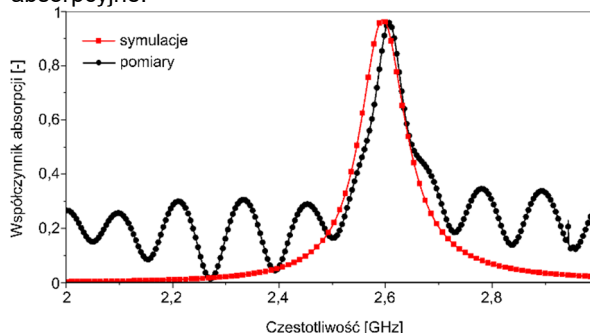


Rys.2. Schemat geometryczny pojedynczej komórki MM



Rys.3. Schemat macierzy metamateriałowej na podłożu dielektrycznym FR-4 (kolor jaśniejszy) składający się z pojedynczych komórek MM (kolor ciemniejszy)

Właściwości EM zaproponowanej rezonansowej macierzy MM zostały wyznaczone za pomocą symulacji numerycznych i walidacji eksperymentalnej (zaprezentowane w [23]). Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe współczynników absorpcji macierzy MM w zakresie częstotliwości od 2 GHz do 3 GHz zaprezentowane w pracy [23]. Uzyskane wyniki wskazują, że ta struktura wykazuje silne właściwości absorpcyjne.



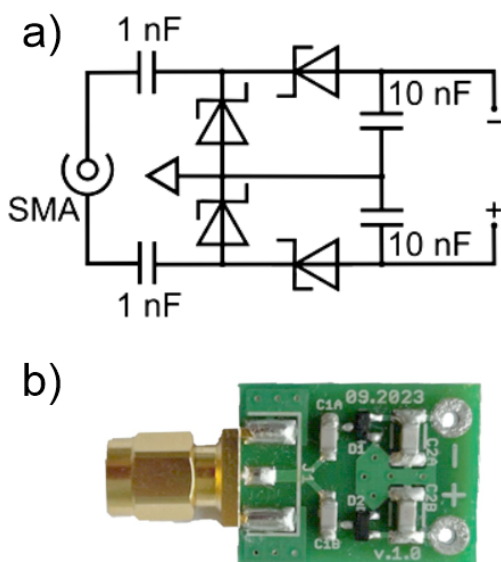
Rys.4. Współczynniki absorpcji macierzy MM w funkcji częstotliwości opublikowane w pracy [23]

Tabela 2. Wymiary pojedynczej komórki MM oraz macierzy MM

Symbol	Wartość [mm]
A	19
B	28,5
C	9,5
D	2
E	3
F	2
G	7,5
H	1,5
I	4
J	54
K	109,5
L	6
M	4
N	8
O	4

### Prototyp harwestera mikrofalowego

Aby ocenić przydatność macierzy MM do pozyskiwania energii EM z otoczenia opracowany i zbudowany został prototypowy harwester EM, składający się z macierzy MM (rys. 3) i konwertera RF/DC (rys. 5). Zadaniem prototypu jest absorpcja promieniowania EM z otoczenia i konwersja jej na użyteczną energię elektryczną.



Rys.5. Schemat elektryczny (a) i rzeczywisty układ (b) konwertera RF/DC

Konwerter RF/DC zawiera 4 mikrofalowe diody Schottky'ego oraz kondensatory o pojemności 1 nF i 10 nF. Optymalna wartość rezystorów umieszczonych w szczelinach pojedynczej komórki MM została eksperymentalnie ustalona na 3 k $\Omega$ .

Połączenie macierzy MM z konwerterem RF/DC w jedno urządzenie wymagało umieszczenia rezystorów w szczelinach każdej pojedynczej komórki MM. Zadaniem rezystorów jest „zamiana” energii elektrycznej ładunków gromadzących się na szczelinach na napięcie.

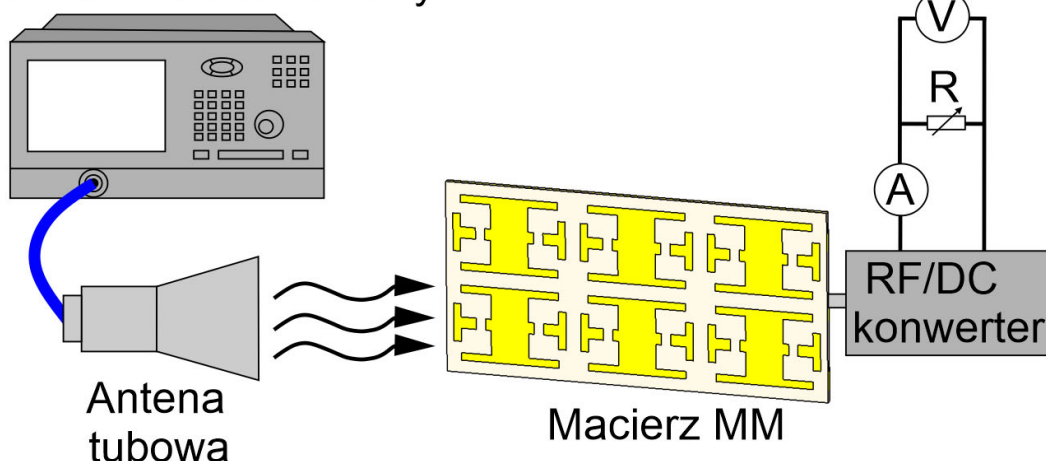
### Eksperymentalne badania efektywności prototypu harwestera mikrofalowego

Działanie i skuteczność konwersji energii EM na energię elektryczną zmierzono w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 6. Układ pomiarowy składał się z generatora mikrofalowego dostarczającego sygnał przewodem współosiowym do szerokopasmowej anteny tubowej. Antena tubowa emitowała promieniowanie elektromagnetyczne w kierunku macierzy metamateriałowej.

Aby dopasować impedancyjnie macierz MM do przyrządów pomiarowych i znaleźć maksymalne napięcie i prąd na wyjściu konwertera RF/DC, do jego wyjścia podłączono dekadę rezystancyjną. Gęstość mocy powierzchniowej promieniowania emitowanego przez antenę o powierzchni 3111 cm<sup>2</sup> (wymiary otworu anteny to: 61 cm x 51 cm) w kierunku macierzy MM wynosiła 3,8 mW/m<sup>2</sup>. Energia promieniowania EM padającego na macierz MM gromadząca się w postaci ładunku elektrycznego w obszarach szczelin komórek MM przekazywana była w postaci napięcia elektrycznego do konwertera RF/DC za pomocą rezystorów umieszczonych w szczelinach. Rezystory były połączone szeregowo szeregowo. Mierzone były napięcie, prąd i moc elektryczna na wyjściu konwertera RF/DC.

Maksymalna wartość mocy wyjściowej wynosiła około 60  $\mu$ W przy napięciu 2 V i prądzie 30  $\mu$ A. Maksymalna efektywność przekształcenia energii EM przez prototyp harwestera mikrofalowego wynosiła około 50% dla częstotliwości 2,59 GHz (jedna z częstotliwości z pasma mikrofalowego pokazanego na rys. 1).

### Generator mikrofalowy



Rys.6. Schemat układu pomiarowego do pomiarów efektywności konwersji promieniowania EM na energię elektryczną przez prototypowy system harwestera mikrofalowego

## Podsumowanie

W pracy zaprezentowano autorską macierz MM składającą się z 6 pojedynczych komórek MM. Macierz MM charakteryzuje się silnymi właściwościami absorpcyjnymi na częstotliwościach mikrofalowych w paśmie 2,6 GHz. Częstotliwość ta może być łatwo zmieniana poprzez zmianę wymiarów mozaiki pojedynczej komórki MM.

Zaproponowano, zbudowano i przetestowano prototyp mikrofalowego systemu do pozyskiwania energii EM. Prototyp składał się z macierzy MM i konwertera RF/DC. Efektywność konwersji energii EM na energię elektryczną osiągnęła wartość około 50%. Zaproponowany prototyp harwestera EM może zasilać urządzenia o niskim zapotrzebowaniu energetycznym, poniżej 0,1 mW (np. aparaty słuchowe, systemy RFID, zegarki, kalkulatory, zegary kwarcowe).

Dotychczasowe wyniki upoważniają nas do planowania dalszych prac nad rozwojem zaproponowanej macierzy MM i konwertera RF/DC pod kątem dopasowania częstotliwości do pasm częstotliwości używanych przez systemy komunikacji bezprzewodowej, które są najmocniejszymi źródłami energii EM w otoczeniu Uniwersytetu Morskiego w Gdyni.

**Autorzy:** mgr inż. Magdalena Budnarowska, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: [m.budnarowska@we.umg.edu.pl](mailto:m.budnarowska@we.umg.edu.pl);  
prof. dr hab. inż. Jerzy Mizeraczyk, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: [j.mizeraczyk@we.umg.edu.pl](mailto:j.mizeraczyk@we.umg.edu.pl).

## LITERATURA

- [1] Capolino, F. Applications of metamaterials. CRC press, 2009
- [2] Mendhe, S. E.; Kosta, Y. P. Metamaterial properties and applications. *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, (2011), 4(1), 85-89
- [3] Chandrasekaran, K. T.; Agarwal, K.; Alphones, A.; Mitra, R.; Karim, M. F. Compact dual-band metamaterial-based high-efficiency rectenna: An application for ambient electromagnetic energy harvesting. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, (2020), 62(3), 18-29
- [4] Hu, W.; Yang, Z.; Zhao, F.; Wen, G.; Li, J.; Huang, Y.; Inserra, D.; Chen, Z. Low-cost air gap metasurface structure for high absorption efficiency energy harvesting. *Int. J. Antennas Propag.*, (2019), 1727619
- [5] Ghaneizadeh, A.; Mafinezhad, K.; Joodaki, M. Design and fabrication of a 2D-isotropic flexible ultra-thin metasurface for ambient electromagnetic energy harvesting. *AIP Adv.*, (2019), 9, 025304
- [6] Almoneef, T.S.; Erkmén, F.; Ramahi, O. Harvesting the energy of multi-polarized electromagnetic waves. *Sci. Rep.*, (2017), 7, 14656
- [7] Singh G.; Marwaha A., A review of metamaterials and its applications. *Int. J. Eng. Trends Technol.*, (2015), vol. 14, 305–310
- [8] Falkenstein, E.; Roberg, M.; Popovic, Z. Low-Power Wireless Power Delivery. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, (2012), 60, 2277–2286
- [9] Oliveri, G.; Werner, D.H.; Massa, A. Reconfigurable electromagnetics through metamaterials – A review. *Proceedings of the IEEE*, (2015), 103 (7): 1034-56
- [10] Pendry, J.B. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys. Rev. Lett.*, (2000), 85, 3966
- [11] Tran, L.G.; Cha, H.K.; Park, W.T. RF power harvesting: A review on designing methodologies and applications. *Micro Nano Syst.Lett.*, (2017), 5, 1–16
- [12] Aldhaeabi, M.A.; Almoneef, T.S. Planar dual polarized metasurface array for microwave energy harvesting. *Electronics*, (2020), 9, 1985
- [13] Amer, A.G.; Othman, N.; Sapuan, S.Z.; Alphones, A.; Salem, A.A. High-efficiency electromagnetic energy harvesting using double-elliptical metasurface resonators. *PLoS ONE*, (2023), 18, e0291354
- [14] Sim, M.S.; You, K.Y.; Esa, F.; Hamid, F. Metamaterials and Metasurfaces for Radio-Frequency Energy Harvesting Applications. In *Metamaterial Technology and Intelligent Metasurfaces for Wireless Communication Systems*; IGI Global: Hershey, PA, USA, (2023), 270–296
- [15] Zhong, H.-T.; Yang, X.-X.; Song, X.-T.; Guo, Z.-Y.; Yu, F. Wideband metamaterial array with polarization-independent and wide incident angle for harvesting ambient electromagnetic energy and wireless power transfer. *Appl. Phys. Lett.*, (2017), 111, 213902
- [16] Zhu, N.; Ziolkowski, R.W.; Xin, H. A metamaterial-inspired, electrically small rectenna for high-efficiency, low power harvesting and scavenging at the global positioning system L1 frequency. *Appl. Phys. Lett.*, (2011), 99, 114101
- [17] Alavikia, B.; Almoneef, T.S.; Ramahi, O.M. Complementary split ring resonator arrays for electromagnetic energy harvesting. *Appl. Phys. Lett.*, (2015), 107, 1–6
- [18] Khan, D.; Basim, M.; Shehzad, K.; Ain, Q. U.; Verma, D.; Asif, M.; Lee, K. Y. A 2.45 GHz high efficiency CMOS RF energy harvester with adaptive path control. *Electronics*, (2020), 9(7), 1107
- [19] Basim, M.; ul Ain, Q.; Shehzad, K.; Shah, S. A. A.; Ali, A.; Jang, B.; Lee, K. Y. A comprehensive review on high-efficiency RF-DC converter for energy harvesting applications. *Journal of Semiconductor Technology and Science*, (2022), 22(5), 304-325
- [20] Budnarowska, M.; Rafalski, S.; Mizeraczyk, J. Vector-Field Visualization of the Total Reflection of the EM Wave by an SRR Structure at the Magnetic Resonance. *Energies*, (2021) 15(1), 111
- [21] Budnarowska, M.; Mizeraczyk, J.; Studański, R.; Bisewski, D. Simulation studies of the electromagnetic properties of a planar metamaterial SRR-dielectric substrate structure in the microwave range. *Przeegląd elektrotechniczny*, (2019), 10, 166-168
- [22] Mizeraczyk, J.; Budnarowska, M. Microwave Metamaterial Absorber with Radio Frequency/Direct Current Converter for Electromagnetic Harvesting System. *Electronics*, (2024), 13(5), 833
- [23] Budnarowska, M.; Mizeraczyk, J. Symulacyjne i eksperymentalne badania właściwości elektromagnetycznych planarnej macierzy metamateriałowej w zakresie mikrofalowym. *Przeegląd Elektrotechniczny*, (2022), 98