

Badania radiolokacyjne oraz ochrona elektromagnetyczna obiektów wojskowych, w tym ładowarek słonecznych

Streszczenie. Artykuł przedstawia opracowaną metodologię badań radiolokacyjnych w tym tłumienności elektromagnetycznej obiektów wojskowych w układzie przestrzennym w celu mapowania odbicia echa radarowego lub właściwości absorpcji. Dokonano pomiarów echa radarowego w zakresie X (4-18 GHz) obiektów badanych oraz referencyjnych. Wyznaczono wartości RCS (Radar Cross Section) dla obiektów rzeczywistych oraz własności tłumienności dla systemów maskowania. Analizie poddano także aktywne urządzenia elektroniczne pod kątem zakłóceń elektromagnetycznych i opisano sposób ich ekranowania.

Abstract. The article presents the developed methodology of radiolocation research, including the electromagnetic attenuation of military objects in a spatial arrangement in order to map the radar echo reflection or absorption properties. Measurements of the radar echo in the X range (4-18 GHz) of the tested and reference objects were made. RCS (Radar Cross Section) values for real objects and attenuation properties for masking systems were determined. Active electronic devices were also analyzed in terms of electromagnetic interference and the method of their shielding was described. (**Radiolocation research and electromagnetic protection of military facilities, including solar chargers**)

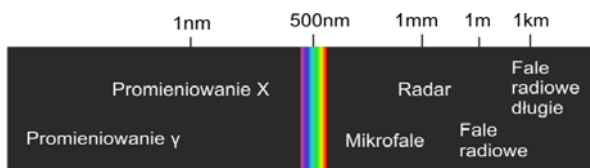
Słowa kluczowe: ochrona elektromagnetyczna, radar, maskowanie, rozpoznanie, ładowarki słoneczne.

Keywords: photovoltaic cells, defect detection, thermograms, image processing, optical methods.

Wstęp

Pełnoskalowe konflikty zbrojne potwierdzają znaczenie artylerii (rakietowej i lufowej) oraz wojsk pancernych w uzyskaniu przewagi militarnej zwłaszcza w przypadku ograniczenia działalności lotnictwa strategicznego lub bombowego [1]. Wysoka skuteczność tych rodzajów wojsk nie jest możliwa bez właściwego rozpoznania. Na dzisiejszym polu walki wykorzystuje się szereg sensorów z różnych zakresów promieniowania elektromagnetycznego (

Rys. 1).



Rys. 1. Schemat widma promieniowania elektromagnetycznego

Rozpoznanie bezpośrednie – realizowane za pomocą nieuzbrojonego oka ludzkiego lub przy wykorzystaniu urządzeń wspomagających, jak lornetki lub nawet sensory termalne jest zwykle przeprowadzane na bliskie odległości. Do przeprowadzania rozpoznania z większych odległości wykorzystywane jest promieniowanie o większych długościach fal – mikrofalowe aż do hektometrowego. Fale o różnych długościach mogą cechować się odmiennymi właściwościami w zakresie przenikania, pochłaniania, czy odbijania przez wybrane ośrodki, co znajduje odzwierciedlenie w ich różnorodnym wykorzystaniu: telekomunikacji, meteorologii, SAR (*Synthetic Aperture Radar*) [2], czy rozpoznaniu wojskowym. Stąd komitet normalizacyjny przy IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), dokonał podziału na tzw. pasma (Tabela 1).

W aplikacjach rozpoznawczych wykorzystuje się kilka pasm: np. pasmo X – stacja radiolokacyjna AN/APG-66 samolotu F-16; pasmo C – stacja radiolokacyjna ZDPSR BYSTRA; pasmo S – NUR-15 – trójwspółrzędny radar uzupełniający do pokrycia radiolokacyjnego i wykrywania celów niskolejących; pasmo Ku – AN/PPS-5C – radar pola walki; pasmo L – 59N6E Protivnik-GE – radar dalekiego zasięgu.

Urządzenia radarowe pracujące w tych zakresach sprzykają podniesieniu świadomości sytuacyjnej na polu walki, gdyż umożliwiają wykrywanie i lokalizację obiektów, a

niezadko także ich identyfikację oraz określenie ich prędkości (wykorzystanie efektu Dopplera). Najnowocześniejsze typy radarów – AESA (*Active Electronically Scanned Array*), dzięki elektronicznemu sterowaniu wielu niezależnych anten, umożliwiają śledzenie wielu celów przy większej dokładności i rozdzielczości przestrzennej. Z kolei radary wykorzystujące technikę syntezy apertury SAR potrafią wygenerować trójwymiarową wizualizację terenu.

Tabela 1. Podział częstotliwości na pasma [3]

Pasma	Zakres częstotliwości [GHz]	Zakres długości fali [cm]	Pasma (nowe oznaczenie)
VHF	0,1 - 0,3	300 - 100	A
UHF	0,3 - 0,5 0,5 - 1,0	100 - 60 60 - 30	B C
L	1 - 2	30 - 15	D
S	2 - 3 3 - 4	15 - 10 10 - 7,5	E F
C	4 - 6 6 - 8	7,5 - 5 5 - 3,75	G H
X	8 - 10 10 - 12	3,75 - 3 3 - 2,5	I J
Ku	12 - 18	2,5 - 1,67	J
K	18 - 26,5	1,67 - 1,1	J (do 20 GHz)
Ka	26,5 - 40	1,1 - 0,75	K
fale milimetrowe	40 - 100	0,75 - 0,3	L (do 60 GHz) M (>60 GHz)

Radary w większości są urządzeniami aktywnymi, wyposażonymi zarówno w antenę nadawczą – emitującą impulsy elektromagnetyczne, jak i odbiorczą – odbierającą odbite echo radarowe od obiektów. Inne tzw. radary pasywne wyposażone są tylko w antenę odbiorczą, a za źródło sygnału mogą służyć inne urządzenia promieniujące: przede wszystkim same obiekty wyposażone w różne układy elektroniczne/elektryczne oraz nadajniki telekomunikacji radiowej, telewizyjnej, czy telefonicznej.

W Wojskowym Instytucie Techniki Inżynierskiej (WITI) we Wrocławiu prowadzone są od dekad prace związane zarówno z maskowaniem jak i kamuflażem obiektów wojskowych oraz prace dedykowane konstrukcji

funkcjonalnych urządzeń dla zastosowań wojskowych i cywilnych [4], w tym ładowarek słonecznych, magazynów energii czy farm fotowoltaicznych [5]. Konstruujemy urządzenia wytwarzające jak i magazynujące energię elektryczną zarówno o małych jak i dużych gabarytach w zależności od wymaganych zastosowań danego urządzenia, czego przykładem jest wytworzony hybrydowy system magazynowania i buforowania energii podwójnego zastosowania.

Dla zastosowań wojskowych kluczowe są kwestie związane z detekcją opracowanych urządzeń przez przeciwnika. Dlatego w niniejszej pracy skupiliśmy się na badaniach radiolokacyjnych oraz ochronie elektromagnetycznej obiektów wojskowych, w tym ładowarek słonecznych.

Tłumienie, a skuteczna powierzchnia odbicia

Ochrona własnych sił przed rozpoznaniem radarowym jest istotnym elementem współczesnego pola walki. Wymaga to, aby obiekty własne cechowały się jak najmniejszą sygnaturą radarową, która zależy od czynnika aktywnego – pochodzącego od urządzeń samego obiektu, emitujących fale elektromagnetyczne oraz od czynnika biernego – sygnału zwrotnego (tzw. echa radarowego) obiektu, a będącego jego odpowiedzią na sygnał emitowanego przez antenę nadawczą radaru. Dążąc do minimalizacji czynnika aktywnego, tak konstruuje się urządzenia aby spełniały normy kompatybilności elektromagnetycznej. Uzyskuje się to poprzez odpowiednie projektowanie systemów elektronicznych/elektrycznych (np. właściwe prowadzenie ścieżek) lub stosuje się ekranowanie w postaci płyt, siatek czy specjalnych farb. Z kolei na wielkość echa radarowego mają wpływ kształt obiektu oraz materiał z jakiego jest wykonany lub jakim jest pokryty. Stąd nowoczesne samoloty wojskowe wytwarza się w technologii *Stealth*, która poprzez odpowiedni kształt płatowca i pokrycie o właściwościach absorpcyjno-rozpraszających minimalizują echo radarowe.

Wartość energii promieniowania powracającą od obiektu do radaru, można wyznaczyć mierząc moc sygnału wracającego do anteny odbiorczej zgodnie z równaniem:

$$(1) \quad P_{RX} = \frac{P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}$$

gdzie, G_{RX} – zysk anteny odbiorczej, G_{TX} – zysk anteny nadawczej, P_{RX} – moc sygnału anteny odbiorczej, P_{TX} – moc sygnału anteny nadawczej, λ – długość fali, σ – skuteczna powierzchnia odbicia, R – odległość obiektu od anteny.

Z równania 1 wynika, że oprócz λ – długości fali, to σ – skuteczna powierzchnia odbicia RCS (*Radar Cross Section*) ma niebagatelną rolę na poziom echa radarowego. RCS jest właściwością cechującą obiekt, stąd służy także do porównywania ich echa, a wyraża energię odbitą od obiektu w stosunku do całkowitej energii padającej na obiekt odniesioną do jednostkowej kuli o powierzchni 1 m², doskonale odbijającej fale we wszystkich kierunkach. Może być wyrażona w m² lub dB. Przykładowe wartości RCS przedstawiono w Tabela 2.

W celu określenia ochrony własnych obiektów w zakresie radiolokacyjnym, przeprowadza się ich badania w różnych układach pomiarowych. Do określenia echa radarowego i wyznaczenia RCS, gdzie istotną rolę pełni kształt i materiał obiektu oraz częstotliwość, wykorzystuje się obrotnicę i obiekt referencyjny (np. odbijacz kątowy) o znanym RCS ustawionym przed badanym obiektem (Rys. 2).

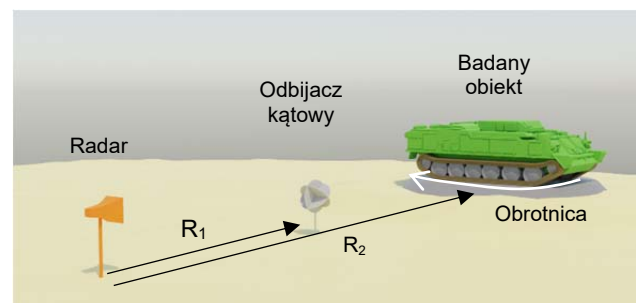
W tabeli 3 przedstawiono wartości RCS oraz maksymalnych zasięgów wykrycia (R_{max}) dla wybranych samolotów.

Tabela 2. Przykładowe wartości RCS dla wybranych obiektów [6]

Obiekt	RCS [m ²]	RCS [dB]
Ptaka	0.01	-20
Człowiek	1	0
Motorówka	10	10
Samochód osobowy	100	20
Samochód ciężarowy	200	23

Tabela 3. RCS oraz zasięg wykrycia (R_{max}) dla wybranych współczesnych modeli samolotów wojskowych [7]

Typ samolotu	RCS [m ²]	R_{max} [km]
F-15C; Su-27	10–15	450–600
MIG-29	5	370–450
F/A-18C	3	330–395
F-16C	1,2	260–310
Su-47	0,3	185–220
F-18E	0,1	140–170
F-35A (<i>stealth</i>)	0,0015	50–60



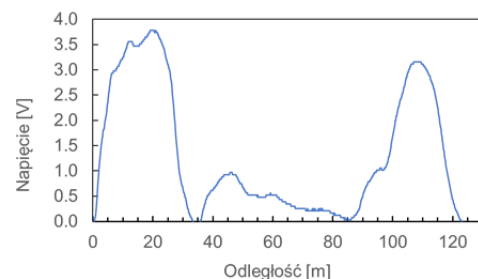
Rys. 2. Układ pomiarowy do wyznaczenia RCS

Badania takie przeprowadza się dla pełnoskalowych obiektów rzeczywistych (Rys. 3).



Rys. 3. Obiekt wojskowy na radarowym stanowisku pomiarowym. Pomiar wykonano na poligonie WITI

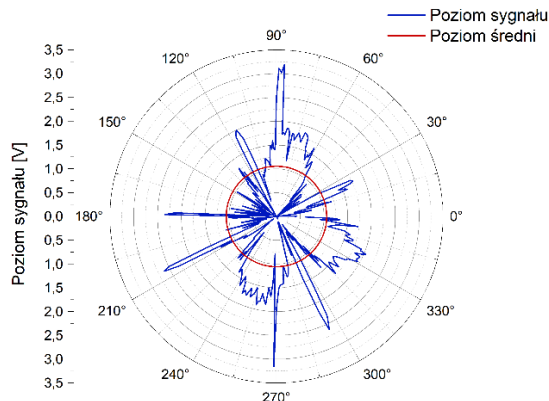
W wyniku badań otrzymuje się poziom sygnału badanego obiektu dla określonego kąta (Rys. 4).



Rys. 4. Wynik pomiaru dla obiektu i wybranego kąta

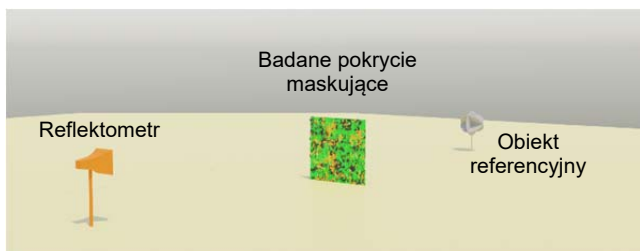
Znając natomiast geometrię pomiaru i RCS obiektu referencyjnego w oparciu o równanie radaru (1) można

wyznaczyć RCS jako kołową charakterystykę echa radarowego (Rys. 5).



Rys. 5. Kołowa charakterystyka echa radarowego

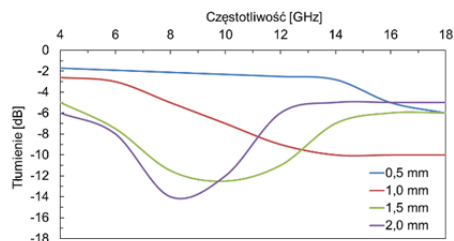
Wyniki tego typu badań wspomagają prace projektowe nad optymalizacją nowo opracowanego sprzętu wojskowego w zakresie zabezpieczenia przed rozpoznaniem radiolokacyjnym. Większość użytkowanego sprzętu cechuje się dużym echem radarowym i w związku z tym wymaga dodatkowego maskowania w postaci np. pokryć maskujących, kamuflażu mobilnego lub specjalnych farb przeciwradiolokacyjnych. Badania tych środków maskujących mają za zadanie określić ich właściwości tłumienne i odbywają się w układzie z obiektem referencyjnym za badany pokryciem lub farbą (Rys. 6).



Rys. 6. Układ pomiarowy do wyznaczania tłumienności

Zwykle pomiaru dokonuje się dla pewnego zakresu częstotliwości i dla kąta o maksymalnym współczynniku odbicia obiektu referencyjnego.

Na rys. 7 przedstawiono przykładową charakterystykę tłumienia promieniowania mikrofalowego w zakresie 4-18 GHz dla farby przeciwradiolokacyjnej wytworzonej z cząstkami żelaza karbonyłowego, jako absorberem [8].



Rys. 7. Charakterystyka tłumienności dla farby przeciwradiolokacyjnej z cząstkami żelaza karbonyłowego

Ochrona elektromagnetyczna

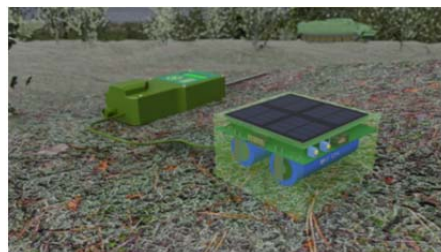
W WITI w ramach projektu TECHMATSTRATEG skonstruowano różnego rodzaju ładowarki fotowoltaiczne na bazie ogniw słonecznych i magazynów energii. Jako ogniwa słoneczne stosowano ogniwa krzemowe i barwnikowe zaś jako magazyny energii superkondensatory

lub baterie litowo-jonowe. Skonstruowano także ładowarki o hybrydowym systemie wytwarzania i magazynowania energii elektrycznej [9]. Wytworzono ładowarki zarówno w wersji cywilnej jak i wojskowej. Dla ładowarek w wersji wojskowej w zakresie widzialnym ochronę przed rozpoznaniem pełnił kamuflaż (Rys. 8).

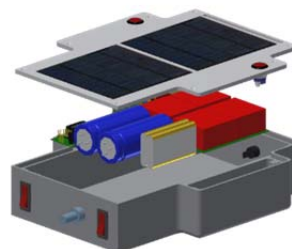


Rys. 8. Ładowarka słoneczna na bazie ogniw krzemowych i superkondensatorów w wersji wojskowej (kamuflażu) skonstruowana w WITI

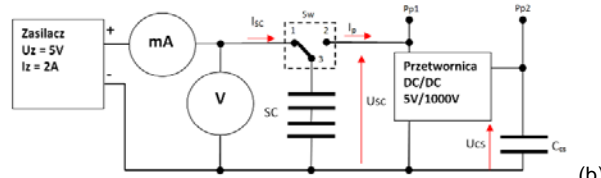
Urządzenia tego typu składające się z układów elektrycznych/elektronicznych np. panelu fotowoltaicznego, układów sterujących i magazynujących energię, mogą być źródłem promieniowania elektromagnetycznego (Rys. 9)



Rys. 9. Wizualizacja ładowarki fotowoltaicznej w zastosowaniu militarnym z uwidocznionymi komponentami elektronicznymi



(a)



(b)

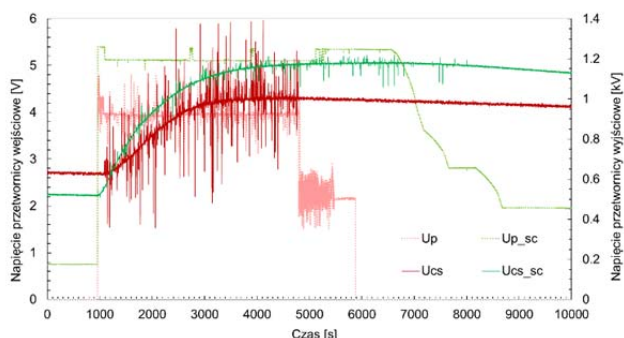
Rys. 10. (a) Wizualizacja zapalarki solarnej skonstruowanej w WITI, (b) Układ pomiarowy przetwornicy wysokiego napięcia

Rozwinięciem koncepcji ładowarki fotowoltaicznej opracowanej w ramach projektu TECHMATSTRATEG była zapalarka solarna, przeznaczona jako alternatywne rozwiązanie do elektrycznego wysadzania ładunków materiałów wybuchowych (Rys. 10a).

W ramach ochrony elektromagnetycznej przeprowadzono pomiary wybranego aktywnego układu urządzenia, a będącego potencjalnym źródłem największych zakłóceń. Zbadano zatem jak wpływa źródło zasilania przetwornicy wysokiego napięcia DC1000V na

poziom zakłóceń na zaciskach zasilania i kondensatorach strzałowych będących jej obciążeniem. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 10b.

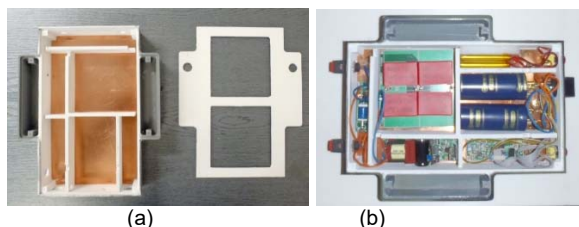
Wynik pomiarów zakłóceń przy zasilaniu przetwornicy z zasilacza oraz z superkondensatorów przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Przebiegi na wejściu i wyjściu przetwornicy DC/DC 5V/1000V przy zasilaniu z zasilacza i z superkondensatorów: Up - Napięcie przetwornicy wejściowe zasilanej z zasilacza; Ucs - Napięcie przetwornicy wyjściowe zasilanej z zasilacza; Up_sc - Napięcie przetwornicy wejściowe zasilanej z superkondensatorów; Ucs_sc - Napięcie przetwornicy wyjściowe zasilanej z superkondensatorów

Z przeprowadzonych badań wynika, że poziom zakłóceń dla zasilania przetwornicy z superkondensatorów jest znacznie mniejszy niż w przypadku zasilania z zasilacza.

W celu zmniejszenia wpływu potencjalnych zakłóceń elektromagnetycznych zastosowano ekranowanie w postaci płyty miedzianej o grubości 0,8 mm, która pełniła także rolę masy głównej, do której podłączono wszystkie moduły w celu wyrównania potencjałów. Płytę miedzianą ulokowano od wewnętrznej strony spodniej części urządzenia (Rys. 12a).



Rys. 12. (a) Obudowa zapalarki z umieszczonym ekranem z blachy miedzianej, (b) Widok wnętrza zapalarki solarnej z widocznymi układami elektronicznymi, ekranem (spód) oraz malowaniem ekranującym – białą farbą od wewnątrz.

Dodatkowo użyto farby absorpcyjnej *NoEm Electro Protector*, której zadaniem, wg producenta, miało być pochłanianie promieniowania w zakresie 0,1 do 100 kHz (Rys. 12b). Farbę poddano także badaniom sprawdzającym poziom tłumienności w zakresie 4-18 GHz. Badania potwierdziły, że farba nie ma własności tłumieniowych w analizowanym zakresie.

Wnioski

Opracowana metodyka badań i innowacyjność proponowanych rozwiązań w pełni udowodniły potrzebę spojrzenia na konstruowane urządzenia dla zastosowań wojskowych, a może i cywilnych w szerszym niż dotychczas aspekcie, czyli na badania radiolokacyjne oraz ochronie elektromagnetycznej. W XXI wieku istotne jest nie tylko konstruowanie wydajnych, trwałych urządzeń ale także umiejętność ich maskowania w szerokim znaczeniu tego słowa tak aby bezpieczeństwo militarne i pozamilitarne było zapewnione.

Przeprowadzone badania potwierdziły potrzebę zastosowania systemów maskowania np. badanych pokryć maskujących umożliwiających obniżenie RCS od kilku do kilkanastu dB z każdej ze stron obserwacji. Analogicznie użycie farb przeciwradiolokacyjnych także obniżyło RCS o podobną wartość. Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie superkondensatorów do zasilania przetwornicy zmniejszyło zakłócenia o blisko 18 dB w porównaniu do zasilania przetwornicy z zasilacza. Mając na uwadze ochronę przed rozpoznaniem planuje się dalsze rozwinięcie technik badawczych w tym zakresie, a także rozszerzenie analizy o modelowanie matematyczne (symulacje komputerowe) [10] przy wstępnie opracowywanych konstrukcjach obiektów wojskowych, w tym pozornych, jak i aktywnych urządzeń elektronicznych.

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) za wsparcie finansowe projektu „Wydajne i lekkie układy zasilające złożone z ogniwa słonecznego i baterii litowo-jonowej oraz ogniwa słonecznego i superkondensatora przeznaczone do zastosowań specjalnych” otrzymane w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne technologie materiałowe”. (Nr TECHMATSTRATEG1/347431/14/ NCBR/2018).

Autorzy: mgr inż. Wojciech PRZYBYŁ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: przybyl@witi.wroc.pl; mgr inż. Ireneusz PLEBANKIEWICZ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, E-mail: plebankiewicz@witi.wroc.pl, dr Krzysztof A. BOGDANOWICZ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: bogdanowicz@witi.wroc.pl, prof. dr hab. Agnieszka IWAN, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, E-mail: iwan@witi.wroc.pl

LITERATURA

- [1] Huo, W.; Jifang Pei, J.; Huang, Y.; Zhang, Q.; Yang, J. A New Maritime Moving Target Detection and Tracking Method for Airborne Forward-looking Scanning Radar. *Sensors* 2019, 19(7), 1586, 1-19; <https://doi.org/10.3390/s19071586>.
- [2] Gao, H.; Li, J. Detection and tracking of a moving target using SAR images with the particle filter-based track-before-detect algorithm. *Sensors* 2014, 14, 10829–10845; DOI: 10.3390/s140610829.
- [3] IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands
- [4] Przybył W., Plebankiewicz I., Bogdanowicz K. A., Januszko A., Iwan A., Rola kamuflażu dla długotrwałego funkcjonowania urządzeń elektrycznych podwójnego zastosowania, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, r. 98 nr 1/2022
- [5] Plebankiewicz I., Bogdanowicz K.A., Iwan A. Photo-Rechargeable Electric Energy Storage Systems Based on Silicon Solar Cells and Supercapacitor-Engineering Concept, *Energies*, 13 (2020) 3867.
- [6] Skolnik M., Introduction to radar systems, Wydanie drugie, McGraw-Hill Inc, 1980, strona 44.
- [7] Prasad N.E., Wanhill R.J.H., *Aerospace Materials and Material Technologies Volume 1: Aerospace Materials*, Springer Nature, 2016, s. 1-343
- [8] Przybył W., Michalski M., Mazurczuk R., Bogdanowicz K. A., Radek N., *Defence Technology Volume 22*, April 2023, Pages 1-9; <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.06.013>
- [9] Iwan A., Plebankiewicz I., Maleczek S., Przybył W., Bogdanowicz K. A., Innowacyjne ładowarki słoneczne – rozwiązania WITI, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2022, 1(1), pp. 155–157
- [10] Przybył W., Mazurczuk R., Kalinowski A., Bogdanowicz K. A., Gaussian model of anti-radar properties for coatings based on carbonyl iron powder, *MDPI Materials* 2023, 16(8), 3050; Published: 12 April 2023; <https://doi.org/10.3390/ma1608305>