

Ochrona krzemowych paneli fotowoltaicznych i ładowarek słonecznych przed rozpoznaniem radarowym

Streszczenie. W artykule przedstawiono innowacyjny sposób ochrony krzemowych paneli fotowoltaicznych i ładowarek słonecznych przed rozpoznaniem radarowym poprzez zastosowanie autorskich rozwiązań opracowanych w WITI. Przeprowadzono pomiary w zakresie pasm C, X, Ku (4÷18 GHz) dla paneli fotowoltaicznych na podłożu sztywnym i elastycznym. Wyznaczono współczynniki odbicia oraz określono wpływ orientacji płyt maskujących i szerokości pasków na wykrywalność panelu fotowoltaicznego w zakresie radarowym.

Abstract. The article presents an innovative method of protecting silicon photovoltaic panels and solar chargers against radar recognition by using proprietary solutions developed at WITI. Measurements were carried out in the C, X and Ku bands (4÷18 GHz) for photovoltaic panels on rigid and flexible substrates. Reflectance coefficients were determined and the influence of the orientation of the masking plates and the width of the stripes on the detectability of the photovoltaic panel in the radar range was determined (**Protecting silicon photovoltaic panels and solar chargers from radar detection**)

Słowa kluczowe: współczynnik odbicia fali mikrofalowej, skuteczna powierzchnia odbicia RCS, panel fotowoltaiczny.

Keywords: microwave wave reflection coefficient, RCS effective reflection surface, photovoltaic panel, solar chargers, camouflage

Wstęp

Technologia fotowoltaiczna określana, jako zrównoważone i czyste źródło energii znajduje obecnie zastosowanie także w wojsku [1] np.: przy zasilaniu namiotów wyposażonych w klimatyzatory, w systemach do produkcji wody z pary czy oświetleniach LED. Systemy te współpracujące z wiatrakami i hybrydowymi generatorami energii, wykorzystujące także nowoczesne technologie magazynowania energii i jej zarządzania pozwalają zmniejszyć nawet o 20 %¹ zużycie paliwa wymaganego do uzyskania energii elektrycznej tradycyjnymi metodami. Na międzynarodowych ćwiczeniach „Capable Logistician 2019” zorganizowanych w Drawsku zaprezentowano proekologiczne rozwiązania pozyskiwania energii elektrycznej w ramach tzw. energii adaptacyjnej/inteligentnej (*Smart Energy*). Zaprezentowany przez armie amerykańską, włoską, francuską, litewską czy kanadyjską potencjał innowacyjnych rozwiązań proekologicznych przy zasilaniu około 30 typów różnego rodzaju urządzeń wykazał, że możliwa jest redukcja paliw kopalnych przy doraźnej produkcji energii elektrycznej (obozowiska) nawet o 80%.

Pomimo niewątpliwych zalet technologii fotowoltaicznych w zakresie pozyskiwania energii posiadają one szereg ograniczeń, które ograniczają ich wejście do powszechnego stosowania w wojsku. Podstawową wadą jest to, że panele lub zestawy fotowoltaiczne elektrowni polowych zajmują duże powierzchnie [2, 3], które wymagają ciągłej ekspozycji na słońce, a tym samym są bardzo podatne na wykrycie różnymi technikami rozpoznania [4]. Aby temu zapobiec mundury czy sprzęt wojskowy pokrywa się wzorem kamuflażowym w celu ochrony obiektu przed rozpoznaniem bezpośrednim, tzn. wykonanym okiem nieuzbrojonym lub za pomocą lornetki, kamery termalnej czy noktowizora. Wiadomym jest, iż w pełnoskalowym konflikcie zbrojnym wykorzystuje się systemy rozpoznania bardziej zaawansowane, działające w szerokim spektrum promieniowania elektromagnetycznego.

W WITI od lat prowadzone są prace nad systemami maskowania w zakresie mikrofalowym, a w szczególności w paśmie 4 ÷ 18 GHz ze szczególnym

uwzględnieniem częstotliwości 10 GHz pasma X (stacja radiolokacyjna AN/APG-66 samolotu F-16). Inne zakresy to pasmo C, 4 ÷ 8 GHz (stacja radiolokacyjna ZDPSR Bystra), oraz pasmo Ku, 12 ÷ 18 GHz (radar pola walki AN/PPS-5C).

Przedmiot i cel badań

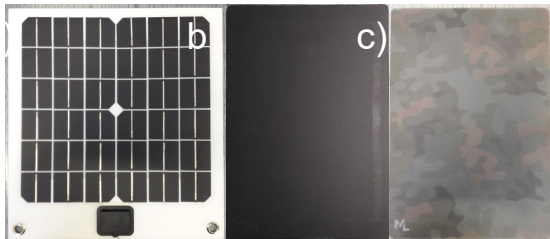
Każdy obiekt znajdujący się w przestrzeni trójwymiarowej opromieniowany falą mikrofalową cechuje tzw. sygnatura radarowa. Określana jest ona, jako skuteczna powierzchnia odbicia RCS (*Radar Cross Section*) i wskazuje ilość energii odbitej od obiektu w stosunku do całkowitej energii padającej na obiekt odniesionej do jednostkowej kuli o powierzchni 1 m², doskonale odbijającej fale we wszystkich kierunkach (źródło izotropowe). Można ją określić, jako ekwiwalent bezstratnej powierzchni zorientowanej prostopadle do kierunku padania fali, która odbija równomiernie (izotropowo) we wszystkich kierunkach energię fali padającej. Umożliwia to odbiór przez odbiornik radiolokacyjny takiej ilości energii, jak średnio w przypadku rzeczywistego obiektu.

Pole przekroju obiektu, materiał, z którego obiekt został wykonany oraz kształt obiektu wprost proporcjonalnie wpływają na RCS [5, 6]. Metalowe duże obiekty o dużych powierzchniach płaskich lepiej odbijają fale, tzn. dają silniejsze echo radarowe, a zatem mogą być wykryte z większej odległości. W zastosowaniach militarnych zazwyczaj chodzi o zmniejszenie możliwości wykrycia obiektu przez nieprzyjaciela i w związku z tym stosuje się specjalne pokrycia i ukształtowanie wojskowych pojazdów czy wojskowych obiektów latających. Należy także zaznaczyć, iż w niektórych zastosowaniach wojskowych (pozoracja) i cywilnych stosuje się specjalne rozwiązania również w celu zwiększenia RCS.

Na rys. 1 przedstawiono zdjęcia paneli fotowoltaicznych/ładowarek słonecznych poddanych badaniom w celu określenia współczynnika odbicia fali mikrofalowej w stosunku do odbicia fali mikrofalowej od wzorca, jakim była płyta metalowa referencyjna o współczynniku odbicia $R(\omega) = 1$. Do badań wybrano następujące krzemowe panele fotowoltaiczne:

¹ RZECZYPOSPOLITA, <https://logistyka.rp.pl/elektromobilnosc/art36923691-panele-solarme-na-ciezarowkach-daja-6-proc-oszczednosci>

- monokrystaliczny, FLEX 18V na podłożu elastycznym (VoltPolska) o parametrach elektrycznych, $V_{oc} = 22,46 \text{ V}$, $I_{sc} = 0,58 \text{ A}$ i wymiarach $280 \times 305 \times 3 \text{ mm}$,
- bez nadruku, zmodyfikowane w firmie MLSystem o parametrach elektrycznych $V_{oc} = 7,2 \text{ V}$, $I_{sc} = 1,17 \text{ A}$ i wymiarach $290 \times 198 \times 8 \text{ mm}$,
- z nadrukiem kamuflażowym, zmodyfikowane w firmie MLSystem o parametrach elektrycznych $V_{oc} = 7,2 \text{ V}$, $I_{sc} = 1,17 \text{ A}$ i wymiarach $290 \times 198 \times 8 \text{ mm}$.



Rys. 1. Panele fotowoltaiczne poddane badaniom: a) panel FLEX 18V, 10 W na podłożu elastycznym, oraz b) panel MLSystem 7,2 V, 7,3 W bez nadruku, c) panel MLSystem 7,2 V, 7,3 W z nadrukiem kamuflażowym zamontowane w ładowarce słonecznej

Analizowane ładowarki fotowoltaiczne wytworzone w MLSystem zbudowane zostały w oparciu o laminaty szklane wykorzystując szkło odżelaznione (low Iron) poddane procesowi wzmacniania chemicznego metodą wymiany jonowej, dzięki czemu poprawiona została odporność na uszkodzenia mechaniczne w porównaniu do standardowego szkła. Dolną powierzchnię stanowi szkło hartowane termicznie o grubości 2,2 mm, które w procesie laminacji trwale i szczelnie połączono z folią enkapsulacją typu PVB (poli(winylobutyral)) o grubości 0,76 mm modyfikowaną dodatkami pigmentu kolorującego oraz ogniwami fotowoltaicznymi. Jako konwerterów użyto ogniw typu Back Contact o sprawności konwersji na poziomie 22,7% i rozmiarze $30 \times 125 \text{ mm}$ połączonych szeregowo za pomocą ribonów o szerokości 2 mm. Górna powierzchnia szkła pokryta została wzorem imitującym kamuflaż. W tym celu wykorzystano nadruk ceramiczny wykonany metodą INK-JET o rozdzielczości nadruku wynoszącej 1440 DPI i grubości nadruku mokrego 35 µm. Nadruk wykonano na bazie tuszu zawierającego w swym składzie nanocząsteczki ceramiczne oraz związki metaliczne w postaci cząstek o średnicy < 100 nm tworząc warstwową grafikę o przezierności fali elektromagnetycznej w zakresie od 480 nm do 980 nm i na poziomie powyżej 65%.

Pierwszym etapem realizacji celu pracy było przeprowadzenie szeregu prób i badań nad maskowaniem obiektów w zakresie mikrofalowym. Wykonano płytę do maskowania mikrofalowego, która jest przedmiotem zgłoszenia patentowego [7], a której widok przedstawiono na rys. 2.



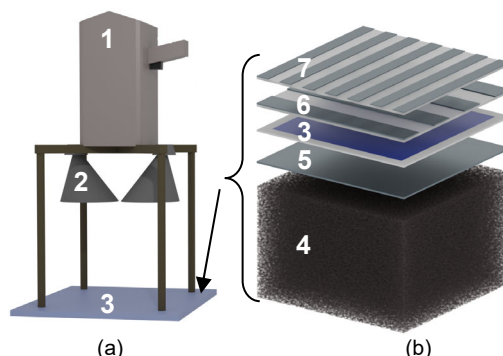
Rys. 2. Płyty PCV maskujące w zakresie mikrofalowym z paskami z folii aluminiowej o szerokości: a) 25 mm, b) 50 mm

Płyta maskująca o wymiarach $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ została wykonana z poli(chloroku winylu) (PCV) i jest przezroczysta dla promieniowania mikrofalowego. Na płycie naklejono

paski folii aluminiowej o szerokości 25 mm i 50 mm w odstępach równych jej szerokości. Wykonano dwie płyty maskujące o grubości PCV 3 mm i 5 mm. W artykule przedstawiono analizę wpływu płyty maskującej, przy grubości PCV 5 mm, na współczynnik odbicia $R(\omega)$ w zależności od szerokości pasków aluminiowych oraz orientacji płyty maskującej względem panelu fotowoltaicznego (rys. 3b).

Omówienie wyników badań

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym [8, 9] przedstawionym na rys. 3a. W pierwszej kolejności przeprowadzono kalibrację stanowiska mierząc współczynnik odbicia od płyty referencyjnej (aluminium), a następnie zmierzono współczynnik odbicia poszczególnych paneli fotowoltaicznych, gdy pod panelem znajdowała się płyta referencyjna.

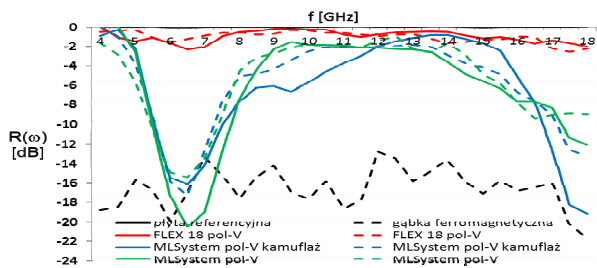


Rys. 3. (a) Stanowisko do pomiaru współczynnika odbicia paneli fotowoltaicznych w zakresie mikrofalowym (1. reflektometr PR-17; 2. antena reflektometru PR17; 3. płyta referencyjna (aluminium)); (b) zastosowana konfiguracja płyty maskującej do panelu fotowoltaicznego (4. gąbka ferromagnetyczna tłumiąca mikrofałe; 5. panel fotowoltaiczny; 6. panel maskujący o szerokości pasków 50 mm (orientacja wertykalna w stosunku do panelu i anten reflektometru PR-17); 7. panel maskujący o szerokości pasków 25 mm (orientacja horyzontalna w stosunku do panelu i anten reflektometru PR-17).)

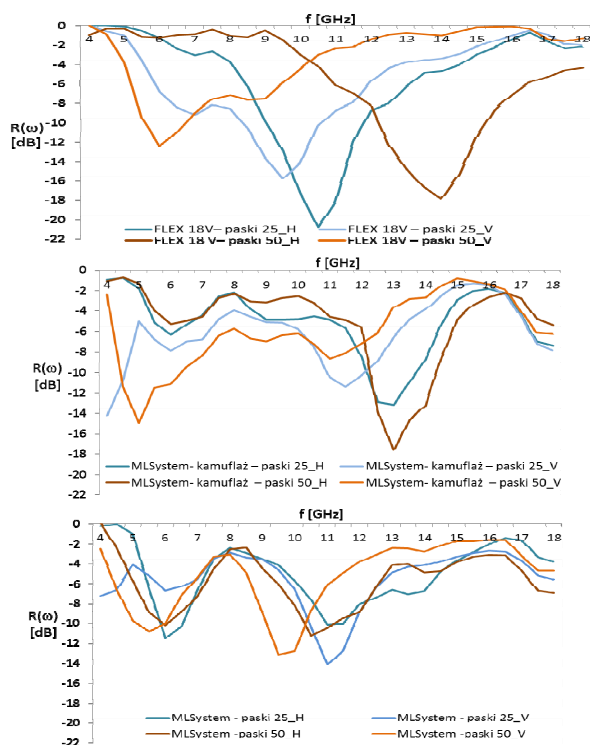
Wyniki badań przedstawiono na rys. 4. (linia ciągła). Następnie wykonano pomiar tła bez płyty referencyjnej z zastosowaniem gąbki ferromagnetycznej (rys. 4) i powtórzono badania współczynnika odbicia dla poszczególnych paneli bez płyty referencyjnej (rys. 4, linia przerywana). Ponieważ stwierdzono, że płyta referencyjna, jako podłoże nie wpływa na współczynniki odbicia paneli fotowoltaicznych w zakresie mikrofalowym o długości fali od 74,9 mm do 16,65 mm, dalsze badania ze względu na stabilność układu pomiarowego wykonywano w konfiguracji płyta referencyjna - panel fotowoltaiczny - płyta maskująca w orientacji wertykalnej (V) lub horyzontalnej (H) oraz przy zastosowaniu orientacji V-H. Podczas wszystkich pomiarów panel fotowoltaiczny był w orientacji V do anten reflektometru (bez i z płytą referencyjną). Sumarycznie przebadano 18 konfiguracji:

- płyta maskująca (z paskami 25 i 50 mm) w orientacji V względem panelu fotowoltaicznego,
 - płyta maskująca (z paskami 25 i 50 mm) w orientacji H względem panelu fotowoltaicznego,
 - zestaw płyt maskujących w orientacji H-V (z paskami 25 i 50 mm) względem panelu fotowoltaicznego,
 - zestaw płyt maskujących w orientacji V-H (z paskami 25 i 50 mm) względem panelu fotowoltaicznego.
- Pomiary wpływu płyty maskującej na współczynnik odbicia promieniowania mikrofalowego przez panele fotowoltaiczne przeprowadzono dla płyty z paskami 25 mm i 50 mm dla dwóch orientacji względem anteny reflektometru,

wertykalnej (V) i horyzontalnej (H). Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 5.

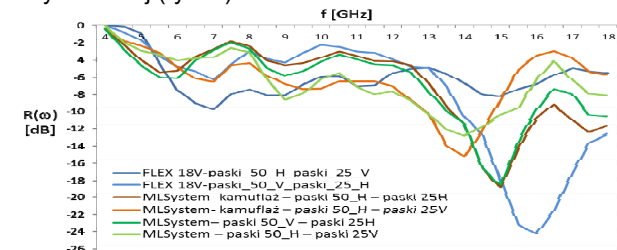


Rys. 4. Współczynnik odbicia poszczególnych paneli fotowoltaicznych w orientacji wertykalnej (V), linia ciągła: podłoże płyta referencyjna, linia przerywana: podłoże gąbka ferromagnetyczna



Rys. 5. Współczynniki odbicia badanych paneli fotowoltaicznych w orientacji wertykalnej (V) i horyzontalnej (H) przy zastosowaniu pojedynczych płyt maskujących 25 mm i 50 mm

Następnie wykonano pomiary wpływu zestawu płyt maskujących na współczynnik odbicia promieniowania mikrofalowego paneli z paskami 25 mm i 50 mm dla dwóch orientacji względem anteny reflektometru, wertykalnej i horyzontalnej (rys. 6).



Rys. 6. Współczynniki odbicia paneli fotowoltaicznych w orientacji V i H przy zastosowaniu zestawów płyt maskujących 25 mm i 50 mm

Analiza wyników badań, pozwala na stwierdzenie, iż

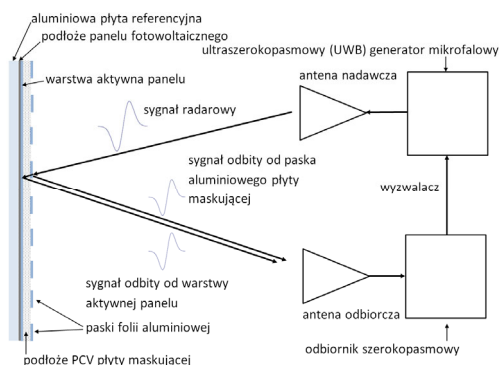
- krzemowy panel monokrystaliczny FLEX 18V w paśmie C wykazuje współczynnik odbicia $R(\omega) = -2,4$ dB,

w paśmie X, $R(\omega) = -0,3$ dB, a w paśmie Ku, $R(\omega) = -1,7$ dB;

- panele fotowoltaiczne MLSytem wykazują minimum współczynnika odbicia w paśmie C, $R(\omega) = -15 \div -20$ dB i na końcu pasma Ku, $R(\omega) = -12 \div -19$ dB;
- minimum współczynnika odbicia panelu fotowoltaicznego FLEX 18V w orientacji wertykalnej (V) i horyzontalnej (H) przy zastosowaniu pojedynczych płyt maskujących 25 mm występuje w paśmie X i osiąga wartość $R(\omega) = -15 \div -20$ dB;
- minimum współczynnika odbicia panelu fotowoltaicznego FLEX 18V w orientacji wertykalnej przy zastosowaniu pojedynczych płyt maskujących 50 mm dla orientacji V występuje w paśmie C i wynosi $R(\omega) = -12,4$ dB, natomiast dla orientacji H, występuje w paśmie Ku i wynosi $R(\omega) = -17,9$ dB;
- minimum współczynnika odbicia panelu fotowoltaicznego MLSytem z kamuflażem w orientacji wertykalnej przy zastosowaniu pojedynczych płyt maskujących 25 mm i 50 mm w orientacji horyzontalnej występuje na początku pasma Ku i osiąga wartość $R(\omega) = -13,7 \div -17,6$ dB;
- dla panelu fotowoltaicznego MLSytem z kamuflażem w orientacji wertykalnej przy zastosowaniu pojedynczych płyt maskujących 25 mm i 50 mm posiada dwa minima w paśmie C, $R(\omega) = -6,7 \div -11,4$ dB i w paśmie X, $R(\omega) = -10,6 \div -14,2$ dB
- dla kombinacji zestawu płyt maskujących 25 mm i 50 mm maksimum współczynnika odbicia wszystkich paneli fotowoltaicznych przesuwają się w zakres pasma Ku i wynosi $R(\omega) = -12,8 \div -24,3$ dB.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że mierzony sygnał jest sygnałem odbitym od panelu fotowoltaicznego i nie zależy od podłoża (rys. 7).



Rys. 7. Zasada pomiaru współczynnika odbicia fali mikrofalowej przez próbkę

Udowodniono, iż poprzez zastosowanie odpowiednich płyt maskujących można kształtować współczynnik odbicia przez panele fotowoltaiczne sygnału mikrofalowego w poszczególnych pasmach radarowych. Zaobserwowano największy pozytywny wpływ zastosowania płyt maskujących dla elastycznego panelu fotowoltaicznego FLEX 18V, gdzie współczynnik odbicia fali mikrofalowej panelu dla wszystkich pasm wynosi $R(\omega) \approx -1,4$ dB; a po

zastosowaniu płyt maskujących 25 mm wykazuje wyraźne minima dla orientacji horyzontalnej w paśmie X, $R(\omega) < -20$ dB, a dla płyt maskujących 50 mm w paśmie Ku $R(\omega) < -17,9$ dB. Z kolei dla paneli MLSystem, zauważono, że charakterystyki współczynnika odbicia są podobne. Szerokość pasków i ich orientacja przesuwają nieznacznie minima w lewo lub prawo na osi częstotliwości. Badania wykazały, że płyty maskujące wpływają w znacznym stopniu na współczynnik odbicia fali mikrofalowej i aby osiągnąć minimum współczynnika odbicia fali mikrofalowej w określonym paśmie płyty maskujące pod względem konstrukcji (25 i 50mm) oraz orientacji względem panelu fotowoltaicznego (H, V) należy dobierać indywidualnie. Podsumowując, uzyskane wyniki, biorąc pod uwagę wymogi normy obronnej dotyczącej pokryć maskujących (NO-10-A208, pkt 2.1.3) są obiecujące gdyż wymagany współczynnik odbicia promieniowania określony w normie jest na poziomie $R(\omega) < -12$ dB.

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) 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. Ireneusz PLEBANKIEWICZ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: plebankiewicz@witi.wroc.pl; mgr inż. Wojciech PRZYBYŁ, Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, e-mail: przybyl@witi.wroc.pl; dr Paweł Kwaśnicki, MLSystem, Zaczernie 190 G, 36-062 Zaczernie, e-mail: pawel.kwasnicki@mlsystem.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: ivan@witi.wroc.pl

LITERATURA

- [1] Plebankiewicz I.; Przybył W.; Solarny Magazyn Energii – rozwiązanie oparte na komercyjnych krzemowych ogniwach słonecznych i superkondensatorach, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 98 (2022), n.1, 139-142
- [2] Szpakowski P.; Farmy paneli fotowoltaicznych na lotniskach – korzyści i zagrożenia, *Safe Sky*, 2 (2022), 4-12
- [3] Przybył W.; Plebankiewicz I.; Bogdanowicz K.A.; Iwan A.; Badania radiolokacyjne oraz ochrona elektromagnetyczna obiektów wojskowych, w tym ładowarek słonecznych, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 99 (2023), n.10, 286-289
- [4] Burciu Z.; Abramowicz-Gerig T.; Przybył W.; Plebankiewicz I.; Januszko A.; The impact of the improved detection of search object on probability of success of SAR action in maritime transport, *Sensors*, 20, (2020), n.14, 3962 (24pp)
- [5] Szklarski A.; Lisowski J.; Prawdopodobieństwo wykrycia małego obiektu pływającego z biernym reflektorem radarowym, *Akademia Morska w Gdyni, Zeszyty naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, 62, (2009), 190-198
- [6] Leszczynski T.; Metody zwiększania rozdzielczości rozpoznawania krótkich sygnałów z liniową modulacją częstotliwości, *Rozprawa habilitacyjna* nr 146, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy
- [7] Plebankiewicz I.; Śliwiński C.; Przybył W.; Mata tłumiąca w zakresie mikrofalowym, P.444100, 2023.03.14
- [8] Fayed M. Sh.; Allam A.M.; Mostafa Sh. F.; Textile fabric treatment against radar detection using carbon black, *Proceeding of the 3rd International Conference on Chemical & Environmental Engineering*, (2006), 338-346
- [9] Fayed M.S.; Allam A.M.; Mostafa S.F.; Ramzy H.; Textile fabric treatment against radar detection using graphite, *Proceeding of the 4th International Conference on Chemical & Environmental Engineering*, (2008), 616-624