

doi:10.15199/48.2024.01.53

Absorber grafenowy do zabezpieczania bezzałogowych statków powietrznych

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania przenikalności elektrycznej i magnetycznej zredukowanego tlenku grafenu w zakresie częstotliwości od 100 MHz do 10 GHz. Badania przeprowadzono dla litego materiału uzyskanego z postaci proszkowej poprzez sprasowanie pod naciskiem 2 kN. Na tej podstawie określono współczynnik pochłaniania warstwy materiałów o grubościach 2.5 oraz 5 mm. Badany materiał może być zastosowany jako absorber mikrofalowy, charakteryzujący się wysoką skutecznością ekranowania, do zabezpieczania elektroniki bezzałogowych statków powietrznych, narażonych na promieniowanie emitowane między innymi przez anteny nadawcze stacji bazowych telefonii komórkowej.

Abstract. In the work the investigation of the permittivity and permeability of the reduced graphene oxide within the frequency range from 100 MHz to 10 GHz has been presented. Investigation were carried out for solid material obtained from the powder form across pressing under pressure of 2 kN. On this base one determined the absorption factor of material layers of thicknesses 2.5 and 5 mm. Investigated material can be applied as microwave absorber, characterized with high shielding effectiveness, to protect of the electronics of unmanned aerial vehicles, exposed to microwave radiation emitted by antennas of the cellular base stations. (**Graphene absorber for unmanned aerial vehicles protection**)

Słowa kluczowe: absorber mikrofalowy, zredukowany tlenek grafenu, bezzałogowy statek powietrzny.

Keywords: microwave absorber, reduced graphene oxide, unmanned aerial vehicle.

Wprowadzenie

Bezzałogowy Statek Powietrzny (BSP) to aparat latający, który nie wymaga do lotu załogi obecnej na pokładzie i jest zdalnie sterowany lub wykonuje lot autonomicznie. Bezzałogowy statek powietrzny potrzebuje do działania dodatkowych elementów, które wzajemnie się komunikują i umożliwiają realizację lotu. Cały system jest nazywany bezzałogowym systemem powietrznym i składa się z następujących podzespołów: bezzałogowy statek powietrzny z wyposażeniem zadaniowym, naziemna stacja kontroli obsługiwana przez operatora, system komunikacji między stacją kontroli a aparatem latającym oraz sprzęt pomocniczy do obsługi i transportu systemu.

Zapotrzebowanie na bezzałogowe statki powietrzne nazywane powszechnie dronami jest bardzo duże. BSP znajdują zastosowanie w takich dziedzinach jak: transport, monitoring, medycyna (transport materiałów medycznych), służby graniczne i celne, straż pożarna, policja i inne służby porządkowe, straż leśna, rolnictwo, geodezja, fotografia, rekreacja i wreszcie zabawa. Drony są również szeroko wykorzystywane przez wojsko do działań rozpoznawczych ale i ofensywnych.

Typowy dron składa się z ramy, która podtrzymuje całą konstrukcję. Na ramie umieszczone są silniki, do których podłączone są regulatory napięcia. Na górze znajdują się śmigła – przymocowane do wałków wychodzących z silników. Na ramie umieszczane są również akumulatory. Ich liczba i pojemność jest zależna od masy drona. Istotnym elementem każdego drona jest moduł IMU (ang. Internal Measurement Unit), zawierający takie komponenty jak akcelerometr, żyroskop i barometr, oprócz tego lepiej wyposażone urządzenia mają także kompas (dzięki niemu dron zawsze "wie", gdzie jest północ, co ułatwia urządzeniu orientację w przestrzeni) oraz moduł GPS.

Zasady wprowadzania BSP na rynek wewnętrzny Unii Europejskiej oraz eksploatacji bezzałogowych systemów powietrznych przeznaczonych do eksploatacji w ramach kategorii otwartej precyzuje Rozporządzenie wykonawcze Komisji UE 2019/947 [1]. Dodatkowo, ze względu na obecność w dronie elektronikę istnieje konieczność oceny zgodności BSP z Dyrektywą kompatybilności elektromagnetycznej [2]. Zgodnie z zapisami Dyrektywy drony powinny być odporne na zakłócenia elektromagnetyczne przy czym producenci odpowiadają za

poprawną pracę urządzeń elektronicznych drona ale do określonego poziomu natężenia pola elektromagnetycznego. Progi odporności na zakłócenia zdefiniowane są w Dyrektywie [2] dla określonych grup urządzeń. Dla typowych, handlowo dostępnych urządzeń elektronicznych – klasa 2 – próg odporności na zakłócenia wynosi 3 V/m. Klasa ta zatem obejmuje popularne BSP. Dyrektywa wymusza co prawda wyższe zabezpieczenia elektroniki – klasa 3 – ale dla urządzeń przemysłowych i medycznych, dla których próg odporności na zakłócenia wynosi 10 V/m.

Nieprzekraczanie progu odporności na zakłócenia jest warunkiem poprawnej pracy urządzenia w warunkach „smogu” elektromagnetycznego w środowisku. Jednakże zgodnie z Rozporządzeniem [3] dopuszczalny poziom natężenia pola elektrycznego („smogu”) wynosi 61 V/m. Usankcjonowane prawnie dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego, np. emitowane ze stacji bazowych telefonii komórkowej, są zatem wielokrotnie wyższe aniżeli próg odporności na zakłócenia. W dodatku w przypadku ekspozycji krótkotrwałej, wywołanej przez pola impulsowe, dopuszczalny poziom natężenia pola elektrycznego wynosi 1952 V/m.

Występowanie w środowisku pól elektromagnetycznych o wartościach wyższych aniżeli próg odporności na zakłócenia może spowodować destrukcyjne skutki oddziaływania na elektronikę drona mogące skutkować niekontrolowanym lotem drona lub jego niekontrolowanym upadkiem. Negatywne skutki upadku dronów obejmują w takim przypadku uszkodzenia elementów infrastruktury podczas spadania dronu, a nawet uszczerbek na zdrowiu człowieka. Wysokie poziomy promieniowania oddziałujące na drona mogą powodować przerwanie łączności z operatorem lub niekontrolowany lot. W efekcie dron może wlecieć w obszary zabronione np. w obszar infrastruktury krytycznej czy obszar lotów samolotów pasażerskich. Na obszarach w pobliżu lotnisk lub innych wojskowych obiektów gdzie używane są urządzenia radiolokacyjne zakłócenia pracy elektroniki i układów nadawczo-odbiorczych drona są bardzo prawdopodobne ze względu na wysoki poziom promieniowania impulsowego, znacznie wyższy od odporności elektrycznej BSP.

Aby zapewnić bezawaryjną i niezakłóconą pracę drona należy go zabezpieczyć przed skutkami oddziaływania pola

elektromagnetycznego poprzez zwiększenie odporności na zakłócenia pojedynczych układów lub całego BSP. Rozwiązanie kwestii zakłóceń elektromagnetycznych wymaga więc właściwego ekranowania, które ochroni wewnętrzną elektronikę i zapewni jej prawidłowe działanie. Skutecznym sposobem na zmniejszenie ryzyka destrukcyjnego oddziaływania promieniowania pola elektromagnetycznego na elektronikę drona jest pokrycie powierzchni BSP absorberem mikrofalowym. Absorber do pokrycia powierzchni drona oprócz własności elektrycznych musi również charakteryzować się małym ciężarem aby nie obciążać drona oraz odpornością na zmienne warunki atmosferyczne. Istotnym wymaganiem dla absorbera przeznaczonego dla BSP jest szerokopasmowy charakter pracy. Dostępne absorbery promieniowania elektromagnetycznego nie nadają się do tego celu, a mianowicie. Handlowo dostępne płytki ferrytowe przeznaczone są raczej do częstotliwości niskich, poniżej 500 MHz i są zdecydowanie za ciężkie dla BSP, gdyż ciężar właściwy płytek ferrytowych wynosi ponad 5 g/cm³. Absorbery bazujące na strukturach węglowych charakteryzują się dobrymi własnościami elektrycznymi takimi jak wysoka wartość przewodności elektrycznej, ale i mechanicznymi, takimi jak niski ciężar właściwy, odporność na korozję i dobre własności termiczne [4-6]. W pracy zaproponowano nowoczesną formę węgla w postaci zredukowanego tlenku grafenu do absorpcji promieniowania mikrofalowego padającego na BSP.

Charakterystyka materiału

Grafen jest alotropową formą węgla. Formami alotropowymi są również grafit, fulereny, nanorurki. Grafen zbudowany jest z pojedynczej warstwy atomów węgla, połączonych w sześciocząłkowe pierścienie. Z kolei w tlenku grafenu do warstwy węglowej dołączone są grupy tlenowe, które w dużej mierze powodują, że materiał ten jest słabym przewodnikiem. Do utrzymania dobrej przewodności z powierzchni tlenku grafenu usuwane są grupy tlenowe. Taka forma nazywana jest zredukowanym tlenkiem grafenu RGO (z ang Reduced Graphene Oxide). Przewodność RGO jest prawie tak dobra jak czystego grafenu. Duża przewodność będzie skutkować wysokim poziomem absorpcji energii mikrofal i może być obiecującym materiałem do ekranowania elektroniki.

W celu określenia własności elektrycznych RGO przeprowadzone zostały pomiary zespolonych przenikalności elektrycznej i magnetycznej. Do pomiarów, sproszkowany materiał RGO, został ukształtowany w postaci toroidalnych próbek w specjalistycznym przyrządzie, w którym pod naciskiem 2 kN otrzymano litą postać. Gęstość otrzymanych próbek wynosiła 1.55 g/cm³ i jest zdecydowanie mniejsza aniżeli gęstość materiałów ferrytowych. Do pomiarów użyto zatem próbek, które są wyłącznie czystym materiałem, bez dodatkowych wypełniaczy, które w dużej mierze zmieniają własności elektromagnetyczne takich kompozytów.

Własności elektryczne i magnetyczne RGO

Konstrytywne własności materiału są określone przez zespolone przenikalności elektryczne i magnetyczne

$$(1) \quad \epsilon_c = \epsilon' - j \epsilon''$$

$$(2) \quad \mu_c = \mu' - j \mu''$$

gdzie: ϵ' , μ' są przenikalnościami elektrycznymi i magnetycznymi, ϵ'' , μ'' określają stratności materiału.

W wyrażeniach (1) i (2) przyjęto znak minus dla części urojonych co jest słuszne dla rotacji $\exp(+j\omega t)$ czyli zgodnej z ruchem wskazówek zegara.

Istnieje wiele metod pomiarów przenikalności elektrycznej i magnetycznej, przy czym generalny ich podział to metody wąskopasmowe oraz szerokopasmowe. W przypadku pomiarów szerokopasmowych, istotnych z punktu widzenia celu niniejszej pracy, można wyróżnić niżej wymienione metody.

- Metody wolno-przestrzenne są najbardziej przydatne ze względu na sposób oddziaływania pola elektromagnetycznego na badany materiał, jednakże realizacja pomiarów jest bardzo utrudniona przez konieczność stosowania dużych gabarytowo rozmiarów materiału celem minimalizacji zjawisk dyfrakcyjnych. Pomiary takie należy prowadzić w komorach bezodbiciowych w celu uniknięcia odbić od ścian i innych przeszkód będących w pobliżu.

- Metody falowodowe są szerokopasmowe (w przypadku falowodów prostokątnych) a nawet ultra szerokopasmowe (w przypadku linii współosiowych). Dodatkowo, pomiary przenikalności w liniach współosiowych pozwalają na uzyskanie konfiguracji padającego pola elektromagnetycznego na badaną próbkę podobnie, jak to ma miejsce w przypadku pomiarów wolnoprzestrzennych, a mianowicie takiej, że wektor elektryczny i magnetyczny padającego pola są równoległe do powierzchni badanego materiału. Z tego powodu, pomiary ϵ i μ zostały przeprowadzone w linii współosiowej.

Przyjmując, że badany materiał jest jednorodny, wartości ϵ i μ można wyznaczyć realizując pomiary zespolonych współczynników macierzy rozproszenia S_{ik} . Przy czym, w przypadku materiału jednorodnego wystarczy pomiar S_{11} oraz S_{21} . Współczynniki te są funkcjami zależnymi od parametrów elektromagnetycznych i geometrycznych badanego materiału:

$$(3) \quad S_{11} = \rho \frac{1-T^2}{1-\rho^2 T^2}$$

$$(4) \quad S_{21} = \frac{(1-\rho^2) T}{1-\rho^2 T^2}$$

$$(5) \quad T = e^{-\gamma d1}$$

gdzie: γ – stała propagacji, ρ – współczynnik odbicia od powierzchni materiału:

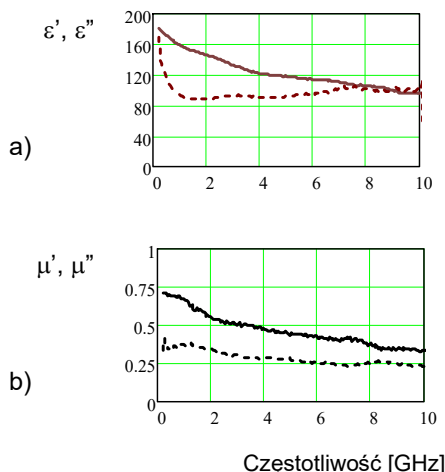
$$(6) \quad \rho = \frac{\sqrt{\mu_c} - \sqrt{\epsilon_c}}{\sqrt{\mu_c} + \sqrt{\epsilon_c}}$$

$d1$ – grubość mierzonej próbki.

Współczynniki macierzy rozproszenia są zatem funkcjami wartości zespolonych ϵ i μ . Wartości te można wyznaczyć rozwiązując układ równań lub korzystając z zależności analitycznych przedstawionych w pracach Nicolson, Ross oraz Weir [7, 8].

Pomiary współczynników S_{11} oraz S_{21} przeprowadzono w analizatorze wektorowym. Układ pomiarowy zbudowany był na bazie linii współosiowej o średnicach 3.04 mm (średnica wewnętrzna) oraz 7 mm (średnica zewnętrzna). Próbkę materiałów umieszczane były w środkowej części linii. Przed właściwym pomiarem pusty zestaw pomiarowy był kalibrowany celem określenia wnoszonych błędów systematycznych. Pomiary współczynników S_{11} oraz S_{21} przeprowadzono w zakresie częstotliwości od 100 MHz do 10 GHz. Pomiarów dla częstotliwości powyżej 10 GHz nie przeprowadzono ponieważ w użytej linii współosiowej o tych średnicach mogą wzbudzać się wyższe rodzaje falowodowe uniemożliwiające zastosowanie przedstawionych wyżej zależności analitycznych. Rozwiązując układ równań (3) i (4) otrzymuje się wartości rzeczywistych i urojonych przenikalności elektrycznej i magnetycznej badanego materiału. Otrzymane wartości

zespolonych przenikalności elektrycznej i magnetycznej sprasowanego materiału RGO przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. a) – przenikalność elektryczna (linia ciągła – wartość rzeczywista, linia przerywana – wartość urojona); b) – przenikalność magnetyczna (linia ciągła – wartość rzeczywista, linia przerywana – wartość urojona)

Wartości zespolonych przenikalności elektrycznej i magnetycznej zostały przedstawione na rys.1, w zakresie częstotliwości od 100 MHz do 10 GHz. Wartości rzeczywistej części przenikalności elektrycznej zawierają się w granicach od 100 do 180. Z kolei część urojona, determinująca stratność materiału, charakteryzuje się bardzo wysokimi wartościami, tj powyżej 85. Przenikalność magnetyczna ma wartości mniejsze od jedności co dokumentuje, że jest to materiał diamagnetyczny. Pomiar przenikalności magnetycznej pokazują, że do oceny własności absorpcyjnych energii pola elektromagnetycznego lub efektywności tłumienia takiego materiału konieczne jest uwzględnianie tej przenikalności. Występowanie zjawiska diamagnetyzmu w zredukowanym tlenku grafenu przyczynia się do magnesowania tej substancji w kierunku przeciwnym do kierunku pola zewnętrznego. W efekcie pole magnetyczne jest zmniejszane. Zjawisko to ma przełożenie na finalny poziom absorpcji energii pola. W badaniach własności elektromagnetycznych materiałów bazujących na strukturach węglowych nie można realizować pomiarów tylko przenikalności elektrycznej, zaniedbując przenikalność magnetyczną.

Skuteczność ekranowania

Najprostszym sposobem zmniejszenia narażenia elektroniki drona na promieniowanie mikrofalowe jest pokrycie jego powierzchni szerokopasmowym absorberem. Absorber może również być nałożony po wewnętrznej stronie obudowy.

Parametrem, który określa efektywność zmniejszania natężenia promieniowania jest skuteczność ekranowania. Zgodnie z definicją skuteczność ekranowania określa ile razy natężenie pola elektrycznego ulegnie zmniejszeniu po przejściu przez warstwę materiału, i jest określona poniższą zależnością [9-11]:

$$(7) \quad SE = \left| \frac{E_i}{E_t} \right|$$

gdzie: E_i – natężenie pola elektrycznego padające na materiał; E_t – natężenie pola elektrycznego po przejściu przez warstwę materiału

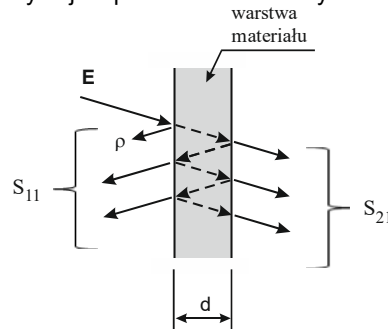
Skuteczność ekranowania najczęściej wyrażana jest w mierze logarytmicznej, zgodnie z zależnością:

$$(8) \quad SE (dB) = 20 \log \left| \frac{E_i}{E_t} \right|$$

Skuteczność ekranowania zależy od wielu czynników, a głównie od:

- konstytutywnych parametrów materiału, czyli od przenikalności elektrycznej i magnetycznej,
- grubości warstwy materiału,
- częstotliwości padającego pola elektromagnetycznego.

Na skuteczność ekranowania składają się dwa czynniki, a mianowicie: straty pochłaniania oraz straty odbiciowe. Graficzna interpretacja ekranowania warstwy materiału, w postaci nieskończonej ilości promieni odbitych i transmitowanych jest przedstawiona na rys.2.



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie wielokrotnych odbić padającej fali elektromagnetycznej na warstwę materiału

Na rys.2 przedstawiono schematycznie propagację fali padającej na warstwę materiału. Na rysunku tym parametr ρ jest współczynnikiem odbicia fali od powierzchni materiału – zależność (6). Pozostała część energii fali wnika do wnętrza i jest tłumiona. Po dotarciu do „tylnej” ścianki materiału część energii zostaje zwrotnie odbita a część propaguje się dalej. Straty odbiciowe są zatem określone przez wszystkie promienie odbite od warstwy przedniej i tylnej materiału (S_{11}). Zatem parametr S_{11} określa sumaryczną wartość natężenia pola elektrycznego wszystkich fal odbitych. Parametr ten jest współczynnikiem odbicia dla próbki materiału w wolnej przestrzeni i jest mierzony w analizatorze wektorowym, a jednocześnie analitycznie jest wyrażony zależnością (3). Promienie, które przechodzą przez materiał są określone przez współczynnik transmisji S_{21} . Współczynnik ten dla warstwy materiału o grubości d jest określony zależnością (4).

Do analizy strat elektromagnetycznych wygodnie jest skuteczność ekranowania wyrazić jako [9-11]

$$(9) \quad SE = \left| \frac{S_i}{S_t} \right|$$

gdzie: S_i – gęstość mocy padająca na materiał; S_t – gęstość mocy po przejściu przez warstwę materiału

Traktując warstwę materiału jako czwórnik, skuteczność ekranowania, określoną zależnością (9), można wyrazić przy pomocy współczynnika transmisji S_{21} .

$$(10) \quad SE = -10 \log(|S_{21}|^2)$$

Przekształcając powyższą zależność otrzymuje się następujące wyrażenie na skuteczność ekranowania warstwy materiału.

$$(11) \quad SE = -10 \log \left(\frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2} \right) - 10 \log(1 - |S_{11}|^2)$$

Poszczególne składniki w wyrażeniu (11) określają straty spowodowane odbiciem (LR) oraz straty pochłaniania w materiale (LA), a mianowicie.

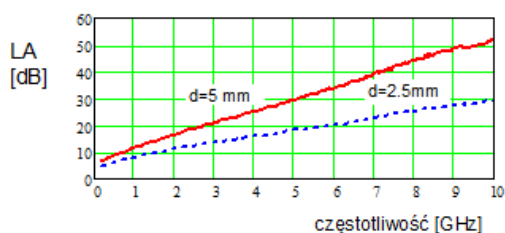
$$(12) \quad LA = -10 \log \left(\frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2} \right)$$

$$(13) \quad LR = -10 \log(1 - |S_{11}|^2)$$

Straty wnoszone przez warstwę absorbera można zatem wyrazić jako straty spowodowane odbiciem (LR) oraz straty pochłaniania w materiale (LA).

$$(14) \quad SE = LR + LA$$

Na podstawie wartości zespolonych przenikalności elektrycznej i magnetycznej można określić wartość strat pochłaniania energii elektromagnetycznej takiego absorbera. Straty pochłaniania (absorbacji) określa się z zależności (12). Współczynniki macierzy rozproszenia, w tej zależności, wyznacza się z wzorów (3) – (5) przy czym jako grubość warstwy przyjmuje się grubość absorbera (d). Dla badanego materiału wartości przenikalności, w funkcji częstotliwości, są przedstawione na rys.1. Wartości LA wyznaczono dla dwóch grubości absorbera, a mianowicie d=2.5 mm oraz 5 mm. Wartości te przedstawiono na rys.3.



Rys. 3. Współczynniki pochłaniania w materiale dla dwóch grubości absorbera

Przedstawione na rys.3 wartości współczynników pochłaniania nazywane są również współczynnikami absorbacji, gdyż obrazują poziom pochłoniętej energii elektromagnetycznej przez materiał. Na rysunku tym poziomy pochłaniania wyrażone są w decybelach dla dwóch grubości, tj. dla cienkiego absorbera o grubości 2.5 mm oraz grubego absorbera o grubości 5 mm. Poziomy pochłaniania energii elektromagnetycznej zwiększa się prawie dwukrotnie dla grubszego absorbera ale taka grubość znacznie zwiększa ciężar całego pokrycia. Projektując pokrycie drona absorberem należy oprócz zapewnienia skuteczności ekranowania elektroniki przez szkodliwym promieniowaniem należy mieć również na uwadze ciężar dołożonego absorbera.

Przedstawione na rys. 3 wartości tych współczynników rosną prawie liniowo w funkcji częstotliwości. Stosunkowo małe wartości pochłaniania energii elektromagnetycznej w niskich częstotliwościach są typową własnością absorberów na bazie struktur węglowych. W przypadku przedstawionego w pracy RGO, dla częstotliwości systemu 5G telefonii komórkowej, tj. dla 3.6 GHz, wartości LA wynoszą: dla grubości absorbera d= 2.5 mm LA = 15 dB, dla grubości 5 mm LA = 23.5 dB.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono absorber mikrofalowy na bazie zredukowanego tlenku grafenu przeznaczony do zabezpieczania elektroniki bezpilotowych statków powietrznych, nazywanych również dronami. Popularne BSP nie są skutecznie zabezpieczone przed promieniowaniem elektromagnetycznym, na przykład emitowanym ze stacji bazowych telefonii komórkowej. Zgodnie z obowiązującym prawem producenci tych urządzeń zapewniają poprawne funkcjonowanie elektroniki jedynie do poziomu natężenia pola elektrycznego 3 V/m.

Jednakże dopuszczalne poziomy natężenia pola elektrycznego w środowisku wynoszą 61 V/m. Tak wysokie poziomy promieniowania elektromagnetycznego mogą powodować zaburzenia pracy drona, skutkujące niekontrolowanym lotem lub jego niekontrolowanym upadkiem.

Zaproponowany absorber umożliwia skuteczne pochłanianie energii elektromagnetycznej. W pracy przeprowadzono badania przenikalności elektrycznej i magnetycznej jak również współczynnika pochłaniania, w dla dwóch grubości absorbera, a mianowicie dla warstwy 2.5 oraz 5 mm. Analizę przedstawiono w funkcji częstotliwości od 100 MHz do 10 GHz. Dla częstotliwości 3,6 GHz tj. dla systemu 5G telefonii komórkowej wartości współczynnika pochłaniania wynoszą 15 dB oraz 23.5 dB odpowiednio dla grubości 2.5 mm oraz 5 mm. Dobór grubości absorbera podyktowany powinien być wymaganiami na konieczność zapewnienia właściwej skuteczności ekranowania elektroniki ale również koniecznością dołożenia dodatkowego ciężaru.

Praca została dofinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 47208.

Authors: prof. dr hab. inż. Roman Kubacki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: roman.kubacki@wat.edu.pl; dr inż. Rafał Przesmycki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: rafal.przesmycki@wat.edu.pl; dr hab. inż. Dariusz Laskowski, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: dariusz.laskowski@wat.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Rozporządzenie wykonawcze Komisji UE 2019/947, z dnia 24 maja 2019 r., w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezałogowych statków powietrznych, Dz. Urz. U.E., 11.6.2019.
- [2] Kompatybilność Elektromagnetyczna (EMC), część 4-3; Metody badań i pomiarów; Badania odporności na promieniowane pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej, PN-EN IEC 61000-4-3: 2021.
- [3] Rozporządzenie Ministra Zdrowia, z dnia 17 grudnia 2019, w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, Dz.U., poz. 2448, 2019.
- [4] Tian S., Zhou L., Liang Z., Yang Y., Wang Y., Qiang X., Huang S., Li H., Feng S., Qian Z., Zhang Y., 2.5 D carbon/carbon composites modified by in situ grown hafnium carbide nanowires for enhanced electromagnetic shielding properties and oxidation resistance, *Carbon*, (2020), nr 161.
- [5] Gupta S., Tai N.H., Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X-band, *Carbon* (2019) nr 152.
- [6] Singh R.K., Kumar R., Singh D.P., Graphene oxide: strategies for synthesis, reduction and frontier applications, *RSC Adv.* (2016) nr 6.
- [7] Nicolson A.M.; Ross G.F., Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, (1968), nr. 19.
- [8] Weir W.B., Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies, *Proc IEEE*, (1974), nr 62.
- [9] Mohr R.J., Fundamental Models for Near-Field Shielding, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, (2008), nr 1.
- [10] Tong X.C., Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding, CRC Press, (2009).
- [11] Montrose M.I., Nakauchi E.M., Testing for EMV Compliance; Approaches and Techniques, IEEE Press Wiley Interscience, (20044, USA).