

doi:10.15199/48.2017.01.29

Badanie możliwości ekranowania pola elektromagnetycznego przez wybrane kompozyty polimerowe

Streszczenie. W poniższym tekście przedstawiono wstępne wyniki badań nad możliwością ekranowania pola elektromagnetycznego kompozytami polimerowo-metalowymi. Zakres badań objął przygotowanie niezbędnych próbek i narzędzi do ich wytworzenia. Przeprowadzono pomiary rezystywności oraz przenikalności magnetycznej kompozytu. Wyniki wskazują, na możliwość zastosowania do ekranowania pól i fal o średnich i wysokich częstotliwościach.

Abstract. The following text presents the preliminary results of research on the possibility of shielding the electromagnetic field of polymer-metal composites. The scope of the research took preparing the samples and tools necessary to produce them. Resistivity and magnetic permeability were measured. (Examination of the possibilities to shield the electromagnetic field by selected polymer composites).

Słowa kluczowe: ekranowanie elektromagnetyczne, kompozyty, EMC, polimer.

Keywords: EM shielding, composites, EMC, polymer.

Wstęp

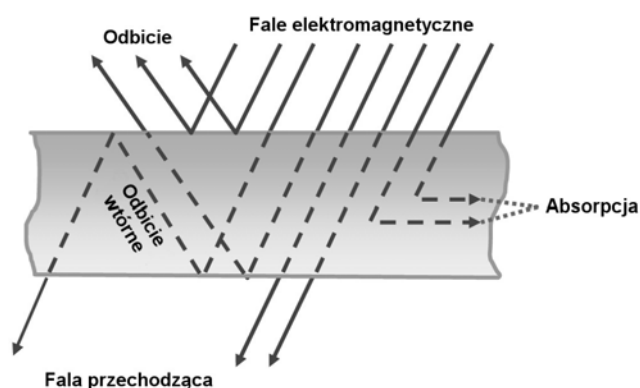
Niezwykle silny rozwój świata elektroniki i elektryczności wywiera nieustanny nacisk na projektantów i producentów sprzętów wszelkiego rodzaju, by ich urządzenia spełniały normy kompatybilności elektromagnetycznej (EMC). Wszechobecność pola elektromagnetycznego o szerokim spektrum częstotliwości powoduje coraz większe narażenie urządzeń oraz ludzi na czynnik elektromagnetyczny. Konieczne jest stosowanie materiałów skutecznie filtrujących lub ekranujących pola i fale elektromagnetyczne, a jednocześnie mających pożądane właściwości mechaniczne (takie jak odpowiednia wytrzymałość mechaniczna, twardość, elastyczność) i charakteryzujących się niewielką masą. Do najczęściej wykorzystywanych materiałów ekranujących należą blachy i siatki z metali przewodzących.

W związku z pojawieniem się nowych technologii w wytwórstwie materiałów pojawiają się różne połączenia materiałów metalowych z tworzywami sztucznymi. Dzięki takim połączeniom uzyskuje się elastyczne i lekkie materiały ekranujące pola i fale elektromagnetyczne. Materiały te służą najczęściej do uszczelniania elektromagnetycznego. Najczęściej spotykane połączenia to elastyczne tworzywo sztuczne jak np. guma, silikon lub pianka z dodatkiem metalowej siatki lub drobin metalu przewodzącego jak np. miedź [1, 2]. Coraz częściej spotyka się różnego rodzaju kompozyty oparte na proszkach SMC (*sheet moulding compounds*) [3-5].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki wykonanych badań i przeprowadzonych pomiarów celem ustalenia właściwości elektromagnetycznych uzyskanych próbek kompozytów polimerowych domieszkowanych metalami. W wyniku takiego połączenia uzyskano dość elastyczny materiał charakteryzujący się właściwościami ekranującymi pola i fale elektromagnetyczne w stopniu zależnym od składu mieszanki. Pomiarów dokonywano na próbkach o różnej zawartości metalu.

Przedmiot badań

Praca stanowi część szerszych badań, których celem jest zbadanie właściwości elektromagnetycznych nowych kompozytów polimerowych, m.in. wyznaczenie parametrów materiałowych analizowanych próbek, oraz stworzenie opisu zjawiska rozpraszania fal elektromagnetycznych w takich kompozytach. Pozwoli to na głębsze poznanie zjawisk zachodzących w badanych próbkach pod wpływem pola elektromagnetycznego wysokiej częstotliwości (rys. 1).



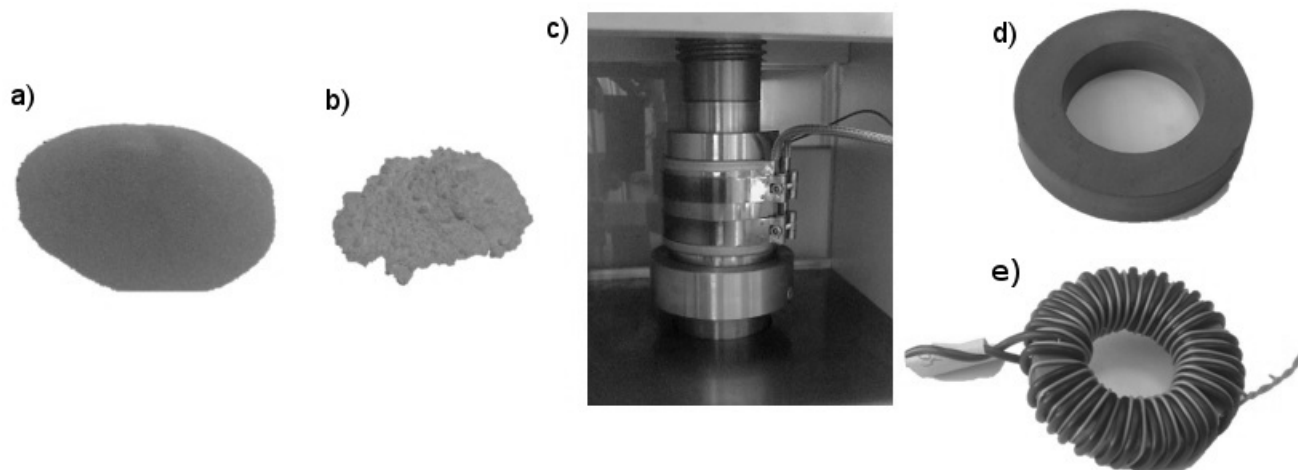
Rys. 1. Idea ekranowania pola elektromagnetycznego [6]

Analizowane próbki to elektroprzewodzące kompozyty polimerowe domieszkowane różnego rodzaju napełniaczami (rozważa się m.in. nanorurki i materiały magnetyczne nanokrystaliczne). Na podstawie prowadzonych badań zostanie opracowana metodyka obliczania optymalnej zawartości napełniacza, dla której otrzymuje się pożądane właściwości w wybranych zakresach częstotliwości fal elektromagnetycznych.

Etapy badania

Spośród wielu możliwych kompozytów do badań wstępnych wybrano kompozyt polichloroku winylu i żelaza. Żelazo miało postać proszku (rys. 2a) o granulacji ziaren > 150 μm . Jako bazę kompozytu wybrano suspensyjny polichlorek winylu PVC-S (rys. 2b) o granulacji ziaren 15-100 μm . O wyborze tego polimeru zadecydowały takiej jego właściwości, jak dobra wytrzymałość mechaniczna, odporność na działanie wielu rozpuszczalników oraz dobre właściwości izolacyjne. Proces wytwórczy kompozytu polegał na odpowiednim zmieszaniu odpowiednich proporcji materiałów i umieszczeniu ich w formie. Odpowiednio przygotowana forma została umieszczona w prasie ze specjalnie zamontowaną opaską grzejną (rys. 2c). Forma była poddana naciskowi 20 kN i ogrzana do 165 $^{\circ}\text{C}$. Czas wygrzewania każdej z próbek trwał 30 minut.

Do celów badawczych wykonano kilka różnych toroidalnych próbek (rys. 2d) ze zróżnicowaną zawartością napełniacza (Fe).



Rys. 2. Proces wytwarzania próbek: a) proszek Fe, b) PVC-S, c) forma i opaska grzewcza, d) wyprasowana próbka, e) toroid pomiarowy

Wyniki pomiarów

Dla każdej z próbek wykonano pomiar przenikalności elektromagnetycznej i rezystywności. Właściwości magnetyczne badano przy użyciu powszechnie znanego układu transformatorowego z dwoma uzwojeniami: pierwotnym i wtórnym nawiniętym na wspólny rdzeń (rys. 2e). Przenikalność magnetyczną wyznaczono ze wzoru

$$(1) \quad \mu_r = \frac{B_m}{\mu_0 H_m},$$

gdzie B_m i H_m są wartościami szczytowymi indukcji magnetycznej i odpowiadającego jej natężenia pola magnetycznego przy danej częstotliwości, a μ_0 jest przenikalnością magnetyczną próżni. Próbka jest toroidalnym rdzeniem o wymiarach: R_1 – promień wewnętrzny, R_2 – promień zewnętrzny, d – wysokość. Nawinięto na niej uzwojenie pierwotne oraz wtórne o liczbie zwojów odpowiednio n_1 i n_2 . W pierwszym przybliżeniu próbkę można traktować jako medium jednorodne o efektywnej przenikalności magnetycznej względnej równej μ_r . Prowadzi to do zależności

$$(2) \quad \mu_r = \frac{1}{n_1 n_2 f d \ln \frac{R_2}{R_1}} \frac{U_2}{I_1},$$

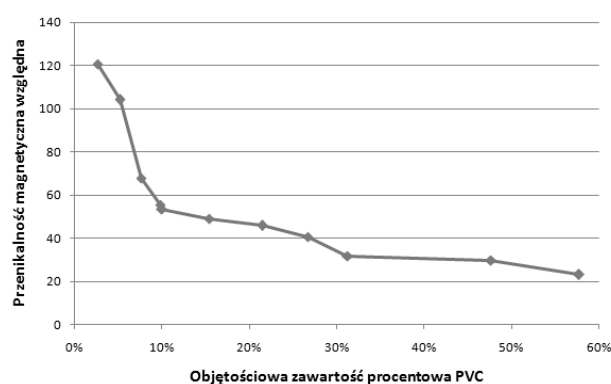
gdzie U_2 jest napięciem mierzonym na zaciskach uzwojenia wtórnego w stanie jałowym, I_1 – natężeniem prądu płynącego w uzwojeniu pierwotnym, a f – częstotliwością. Wykonano pomiary dla kilku wartości napięcia i prądu i wzięto wartość średnią. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresie pokazanym na rysunku 3.

Właściwości elektryczne (rezystywność ρ) wyznaczono na podstawie wskazań mostka LCR 701 APPA. Zmierzoną rezystancję R przeliczono na rezystywność wg wzoru

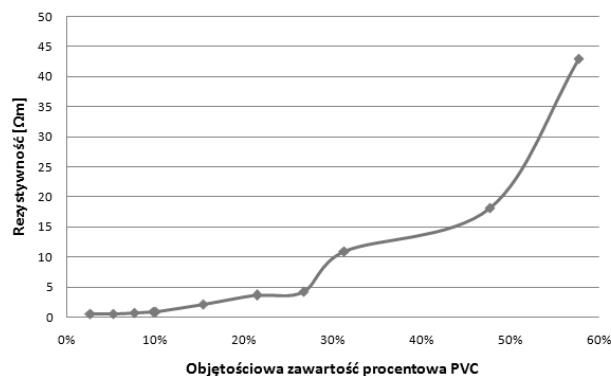
$$(3) \quad \rho = \frac{RS}{l} = \pi \frac{R_2^2 - R_1^2}{d} R,$$

gdzie S i l są odpowiednio przekrojem poprzecznym próbki oraz jej długością. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresie pokazanym na rysunku 4.

Z rysunków 3 i 4 wynika, że wartości względnej przenikalności magnetycznej i rezystywności kompozytu zmieniają się w sposób skorelowany. Im większa zawartość polimeru tym mniejsza względna przenikalność magnetyczna i tym większa rezystywność.

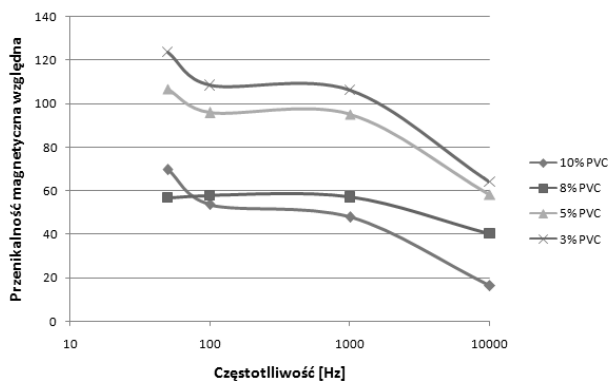


Rys. 3. Względna przenikalność magnetyczna kompozytu PVC + Fe w zależności od procentowej zawartości PVC dla 50 Hz



Rys. 4. Rezystywność kompozytu PVC + Fe w zależności od procentowej zawartości PVC dla prądu stałego

Przedstawione pomiary zostały wykonane przy częstotliwości 50 Hz. Docelowym obszarem badań są częstotliwości rzędu kilo- i megaherców, a nawet większe. Dlatego też wykonano dodatkowe pomiary przenikalności magnetycznej względnej za pomocą systemu pomiarowego Metis HyMAC (dla czterech próbek o najmniejszej zawartości PVC). Rysunek 5 przedstawia jej zależność od częstotliwości dla kilku wartości procentowej zawartości PVC w kompozycie. Wraz ze wzrostem częstotliwości przenikalność magnetyczna maleje.



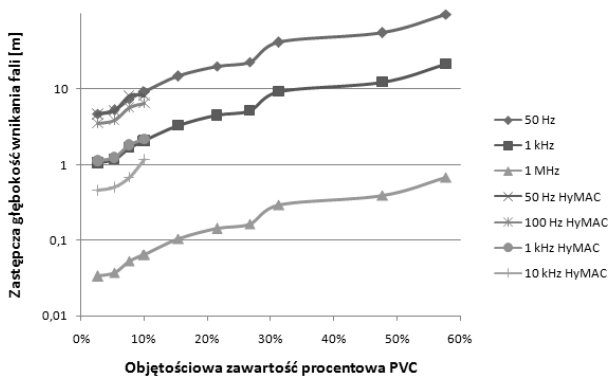
Rys. 5. Względna przenikalność magnetyczna kompozytu PVC + Fe w zależności od częstotliwości dla wybranej zawartości procentowej PVC

Właściwości ekranujące pole elektromagnetyczne

Na podstawie wykonanych pomiarów przenikalności magnetycznej i rezystywności kompozytu wyznaczono zastępczą głębokość wnikania fali elektromagnetycznej w funkcji procentowej zawartości PVC dla różnych częstotliwości:

$$(4) \quad \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}$$

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 6. Obliczenia wykonano w dwóch wariantach. W pierwszym przyjęto stałe wartości przenikalności magnetycznej oraz rezystywności wg rysunków 3 i 4. Na rysunku 6 odpowiadają im dłuższe linie. W rzeczywistości efektywna przenikalność magnetyczna zależy od częstotliwości (rys. 5), dlatego też w drugim wariacie uwzględniono ten fakt (krótsze linie na rysunku 6).



Rys. 5. Zastępcza głębokość wnikania fali elektromagnetycznej do kompozytu PVC + Fe w zależności od procentowej zawartości PVC dla wybranych częstotliwości

Zastępcza głębokość wnikania pola w zakresie rozpatrywanych częstotliwości jest stosunkowo duża. Wynika stąd, że badany kompozyt ma słabe właściwości ekranujące w tym zakresie częstotliwości. Poprawy można upatrywać w innym doborze składu kompozytu lub zastosowaniu go w zakresie wyższych częstotliwości.

Zastosowanie teorii medium efektywnego

W celu wykorzystania w pełni właściwości kompozytów innowacyjnych, wymagane jest przeprowadzenie zarówno badań eksperymentalnych jak i sformułowanie teoretycznego opisu procesu rozpraszania fal elektromagnetycznych w tych materiałach. Do opisu właściwości materiałowych w tego rodzaju materiałach

często stosuje się teorię medium efektywnego [7]. Polega ona na tym, że w miejsce rzeczywistego medium heterogenicznego wprowadza się zastępcze medium homogeniczne o uśrednionych parametrach materiałowych. Ze wstępnej analizy literatury wynika, że do tego celu powinny nadawać się modele oparte na formalizmach Maxwella Garnetta, Bruggemana oraz im pokrewnych [8-10]. Modele te przewidują wartości parametrów materiałowych medium efektywnego w zależności od parametry materiałowych składników kompozytu i ich ułamkowej zawartości objętościowej. Wymagają one informacji także o kształcie wtrąceń jednego składnika w drugi i najczęściej przyjmują, że wtrącenia te mają kształt sferyczny lub elipsoidalny. Istotne jest również, czy rozpatruje się pola statyczne, czy też harmoniczne o częstotliwościach porównywalnych z rozmiarem wtrąceń. Formalizmy te działają zwykle stosunkowo dobrze dla małej zawartości jednego materiału w drugim.

W celu sprawdzenia, czy mogą być one zastosowane w odniesieniu do badanego kompozytu wykonano wstępne obliczenia dla przenikalności magnetycznej oraz rezystywności w zakresie pól stałych lub charakteryzujących się długością fali znacznie większą od rozmiaru ziaren Fe (150 μm). W tym zakresie formalizm Maxwella Garneta (MG) prowadzi do wyrażenia:

$$(5) \quad p_{ef}^{MG} = p_m \frac{p_w + 2p_m + 2f_w(p_w - p_m)}{p_w + 2p_m - f_w(p_w - p_m)}$$

gdzie p_{ef} , p_w , p_m oznaczają odpowiednio parametr materiałowy efektywny, wtrącenia oraz medium, w którym to wtrącenie stanowi ułamek objętościowy f_w . Z kolei formuła Bruggemana (B) daje przewidywanie

$$(6) \quad p_{ef}^B = \frac{b + \sqrt{b^2 + 8p_w p_m}}{4},$$

gdzie $b = (2p_m - p_w + 3f_w(p_w - p_m))$.

W przypadku statycznym pola magnetycznego parametr materiałowy p jest przenikalnością magnetyczną względną, a przypadkiem stałego pola elektrycznego – konduktywnością elektryczną. Obliczenia wykonane za pomocą tych formuł prowadzą do wniosku, że w rozpatrywanym zakresie są one nieodpowiednie dla rozpatrywanego kompozytu. O ile w przypadku przenikalności magnetycznej rezultaty są tego samego rzędu, co z pomiarów, to dla rezystywności otrzymuje się wyniki zupełnie rozbieżne z pomiarami. Przyczyna tego tkwi zapewne w niespełnieniu założeń co do sferycznego kształtu wtrąceń, ich separacji w medium, a także w niepewności co do wartości niektórych parametrów. W przypadku rezystywności istotna jest bardzo duża różnica w wartościach tego parametru dla obydwu składników (kilkanaście rzędów wielkości). Dlatego w dalszych pracach należy wziąć pod uwagę inne, bardziej złożone teorie medium efektywnego.

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań i pomiarów próbek kompozytów polimerowych PVC domieszkowanych żelazem. Opracowano sposób wytwarzania toroidalnych próbek takich kompozytów do celów badawczych oraz wykonano próbki o różnej zawartości składników. Zarejestrowano wartości rezystywności i przenikalności magnetycznej uzyskanych kompozytów. Wyniki badań stanowią punkt wyjścia do opracowania kompozytów o właściwościach ekranujących, które mogą przyczynić się do poprawy jakości życia ludzi. Praktycznym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonych badań

eksperymentalnych jest określenie optymalnej zawartości napełniacza w kompozycie oraz ustalenie właściwych warunków przetwórstwa. Wstępne badania teoretyczne wskazują na konieczność poszukiwania bardziej adekwatnej teorii medium efektywnego. Dalsze badania będą polegały także na doborze składu jakościowego i ilościowego kompozytu w celu uzyskania wymaganych właściwości elektromagnetycznych.

Autorzy: mgr inż. Damian Bambynek, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: d.bambynek@gmail.com; dr inż. Adam Jakubas, Politechnika Częstochowska, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: adam.jakubas@gmail.com; dr hab. inż. Paweł Jabłoński prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: paweljablonski7@gmail.com

LITERATURA

- [1] Sonoda K., Teirikangas M., Juuti J., Moriya Y., Effect of surface modification on dielectric and magnetic properties of metal powder/polymer nanocomposites, *J. Magn. Mater.*, 323 (2011), 2281-2286.
- [2] De Paulis F., Nisanci M. H., Orlandi A., Koledintseva M. Y., Drewniak J., Design of homogeneous and composite materials from shielding effectiveness specifications, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 56 (2) (2014) 343-351.
- [3] Jankowski B., Ślusarek B., Szczygłowski J., Chwastek K., Modelling hysteresis loops in Fe-based soft magnetic composites using Takács description, *Acta Phys. Pol. A* 128, 116 (2015).
- [4] Ślusarek B., Szczygłowski J., Chwastek K., Jankowski B., The effects of excitation conditions and annealing temperature on power loss in SMC cores, *COMPEL* 34, 637 (2015).
- [5] Kollár P., Füzér J., Bureš R., Fáberová M., AC magnetic properties of Fe-based composite materials, *IEEE Trans. Magn.* 46, 467 (2010).
- [6] Maity s., Singa K., Debnath P., Singha M., Textiles in electromagnetic radiation protection, *Journal of Safety Engineering* 2 (2013) 11-19.
- [7] Choy T. C., Effective medium theory. Principles and applications. *Clarendon Press*, Oxford 1999.
- [8] Sihvola A., Electromagnetic mixing formulas and applications, *IEE Press*, London 1999.
- [9] Bottauscio o., Chiampi M., Manzin A., Multiscale modeling of heterogeneous magnetic materials, *Int. J. Numer. Model.* 27 (2014), 373-384.
- [10] Raut H. K., Anand Ganesh V., Sreekumaran Nair A., Ramakrishna S., Anti-reflective coatings: a critical, in-depth review, *Energy Environ. Sci.* 4 (2011) 3779-3804.