Konrad SOBOLEWSKI[1], Kamil DYDEK[2]

Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny (1), Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej (2)

doi:10.15199/48.2017.10.23

Badanie obudowy kompozytowej jako środka ochrony przed nanosekundowymi impulsami pola elektromagnetycznego

Streszczenie. *Poniższy artykuł zawiera charakterystykę materiału kompozytowego zastosowanego jako ekran pola elektromagnetycznego. Opisany został proces przygotowywania kompozytu i pomiary jego podstawowych parametrów elektrycznych. Następnie przedstawione zostało stanowisko laboratoryjne skonfigurowane do pomiaru skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano serię wyników, które również zostały przedstawione w niniejszym artykule. Na koniec przedstawiono krótkie podsumowanie wykonanych prac oraz wypunktowano najważniejsze wnioski.*

Abstract*. The following article contains the characteristics of the composite material used as the electromagnetic field screen. The process of composite preparation and measurement of its basic electrical parameters has been described. Then a experiment configuration was set up to measure the efficiency of electromagnetic shielding. As a result of the research, a series of results has been obtained, which are also presented in this article. Finally, a brief summary of the work was presented and the most important conclusions were drawn. (**Examination of the composite housing as a means of protection against the nanoseconds electromagnetic field pulses**).*

Słowa kluczowe: materiały kompozytowe, włókna węglowe, ekranowanie pola elektromagnetycznego, nanosekundowe pole elektromagnetyczne, ochrona przed NEMP.
Keywords: composite materials, carbon materials, electromagnetic field shielding, nanoseconds electromagnetic field, NEMP protection.

Wprowadzenie

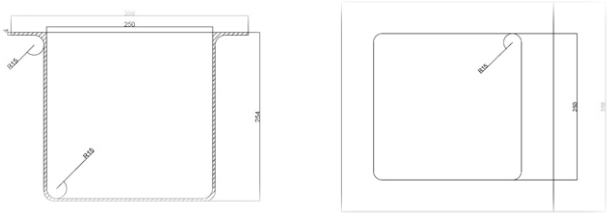
Postęp technologiczny wiąże się ze wzrostem liczby coraz bardziej wyrafinowanych urządzeń elektronicznych otaczających człowieka, bez których trudno jest wykonywać codzienne zadania. Ponieważ czas przeznaczony na wykonanie danego zadania jest coraz krótszy, stąd preferowane są w pierwszej kolejności urządzenia pracujące z największą szybkością i najbardziej stabilne elektromagnetycznie. Oba te fakty powodują, że możemy z jednej strony obserwować narastającą ilość smogu elektromagnetycznego, który bezpośrednio przekłada się na wzrost poziomu oraz prawdopodobieństwo wystąpienia zaburzeń mogących zakłócić pracę lub wręcz zniszczyć wrażliwe urządzenie elektroniczne. Z drugiej zaś strony postępujący proces miniaturyzacji prowadzi do mniejszych poziomów odporności urządzeń elektronicznych. W szczególności należy rozważyć ochronę wrażliwych na zaburzenia elektromagnetyczne urządzeń cyfrowych o dużej częstotliwości pracy lub urządzeń analogowych o bardzo małych poziomach sygnałów roboczych. Rozpatrując dodatkowo urządzenia elektroniczne o znaczeniu strategicznym należy w praktyce określić kryteria doboru środków ochronnych i ich parametrów, wśród których skuteczność tłumienia pola elektromagnetycznego może być tylko jednym z wielu. Wielkiego znaczenia w określonej sytuacji nabierają takie cechy jak łatwość produkcji (co bezpośrednio przekłada się na cenę danego rozwiązania i szybkość wdrożenia), łatwość kształtowania skomplikowanych form, czy waga ekranu. Jedną z możliwych dróg rozwoju jest wykorzystanie materiałów kompozytowych. Niniejszy artykuł zawiera opis przykładowego materiału kompozytowego oraz przeprowadzonych badań w zakresie pomiaru skuteczności tłumienia pola elektromagnetycznego. W artykule przedstawiono również uzyskane w trakcie badań wyniki i wyciągnięte na ich podstawie wnioski.

Produkcja kompozytowej obudowy

Pierwszym zadaniem było wytworzenie odpowiedniego materiału do budowy pojemnika ekranującego. Z racji określonych wymagań w zakresie produkcji oraz parametrów mechanicznych i elektrycznych do testów wybrany został materiał kompozytowy na bazie włókien węglowych. Definicja takiego materiału określa, iż jest to materiał o niejednorodnej strukturze, na którą składają się dwa lub więcej komponenty, a każdy z nich spolaryzowany jest w innym kierunku i odznacza się innymi właściwościami [1].

Poddawane badaniom kompozytowe pudełko zostało wykonane na osnowie żywicy epoksydowej Epidian 52 firmy Organika Sarzyna, utwardzanej utwardzaczem Z-1, natomiast jako zbrojenie wykorzystano wysokowytrzymałą tkaninę węglową o splocie twill 2/2 i ułożeniu włókien pod kątem 0˚/90˚ firmy ECC Fabrics. Gramatura tkaniny wynosiła 160g/m2, a grubość 0,38mm. Użyto osiem warstw tkaniny typu Tenax Style 442, natomiast włókno węglowe było typu Tenax-E HTA40 E13. Udział wagowy zbrojenia w kompozycie wynosił 45,5%.

Na bazie wytworzonych tkanin wykonano panele kompozytowe i przeprowadzone zostały wstępne testy. Ich wyniki opisane zostały w publikacji [2]. W celu wytworzenia kompozytowej skrzyni na początku wykonano model w programie typu CAD (rys. 1), a następnie została przygotowana forma, która przed rozpoczęciem laminowania została pokryta rozdzielaczem w celu oddzielenia pudełka od formy.



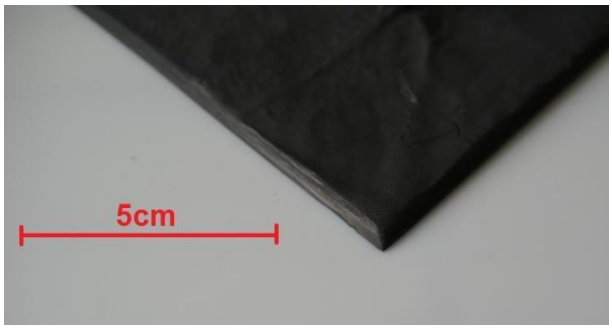
Rys. 1 Przekrój poprzeczny modelu skrzynki oraz jej widok z góry.

W następnym kroku kolejne warstwy tkaniny w kompozycie były układane pod kątem 45˚ w stosunku do poprzedniej warstwy. Miało to na celu zagęszczenie struktury zbrojenia w różnych kierunkach, czego efektem byłoby efektywniejsze ekranowanie (struktura zbliżona do izotropowej). Warstwy tkaniny w kompozycie były układane z pełnych arkuszy, dzięki czemu została zachowana ciągłość włókien. Na rys. 2 pokazano gotowy element kompozytowy.

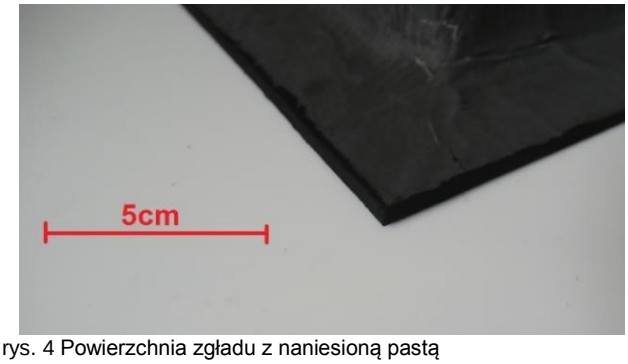
Skrzynka, podobnie jak w przypadku paneli [2], została wykonana metodą worka próżniowego. Kompozyt znajdował się w worku pod próżnią przez 4 godziny, a następnie był wygrzewany w piecu w temperaturze 45˚C przez okres 16 godzin. Po oddzieleniu pudełka od formy

wykonano skośny zgład na jego krawędzi, a następnie naniesiono przewodzącą pastę wykonaną z dwuskładnikowego silikonu Sylgard 170 [3] z dodatkiem nanorurek węglowych NC7000 [4]. Celem niniejszego zabiegu była poprawa elektrycznego połączenia włókien ze wszystkich warstw kompozytu, co będzie skutkowało jeszcze lepszym ekranowaniem. Na rys. 3 przedstawiono powierzchnię zgładu przed nałożeniem pasty, a na rys. 4 po jej nałożeniu.

Rys. 2 Gotowe kompozytowe pudełko (widok z boku i z góry).



rys. 3 Przygotowana powierzchnia zgładu



rys. 4 Powierzchnia zgładu z naniesioną pastą

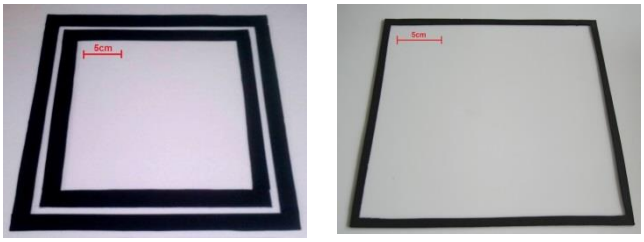
Ponieważ celem było wykonanie pojemnika chroniącego z każdej strony stąd pokrywa do skrzynki została wykonana z tych samych substratów co pudełko. Użyto siedmiu warstw tkaniny węglowej, a otrzymana płyta miała grubość ok. 1,8 mm. Wzorem przypadku pudełka, kolejne warstwy w kompozycie były obrócone o kąt 45˚ w stosunku do poprzedniej.

Wytwarzanie przewodzącej uszczelki

W celu poprawy kontaktu pokrywy z pozostałą częścią pudełka wykonana została przewodząca uszczelka, również na bazie nanokompozytów. Jej bazą był polimerowy silikon Sylgard 170 Silicone Elastomer firmy Dow Corning [3], natomiast na zbrojenie wykorzystano wielościenne nanorurki węglowe NC7000 [4]. Postanowiono, że udział wagowy nanorurek w nanokompozycie będzie wynosił 3% masy.

Sylgard 170 jest dwuskładnikowym silikonem o stosunku składników 1:1. Czas sieciowania w temperaturze pokojowej wynosi 24 godziny, jednak można go skrócić, umieszczając mieszaninę w podwyższonej temperaturze. Posiada niską lepkość oraz odporność na wysokie temperatury. Potrafi osiągnąć wydłużenie na poziomie 165%. Kompozyt silikon-nanoruki węglowe został wykonany metodą kalandrowania.

Przygotowana mieszanka została rozprowadzona w uprzednio przygotowanej formie. Za podstawę formy wykorzystano płytę wykonaną z teflonu. Miało to celu zapobiegnięcie przyklejenia się usieciowanej uszczelki. Forma oraz gotowa uszczelka zostały przedstawione na rys. 5.

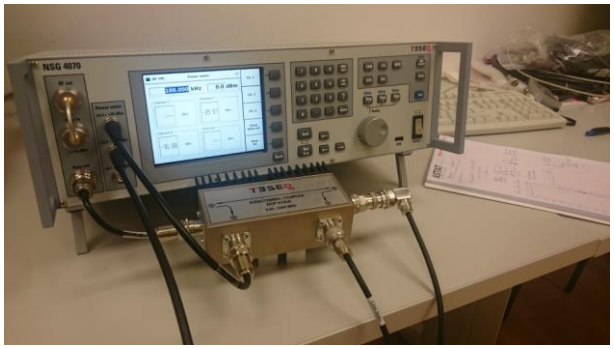


Rys. 5 Przygotowana forma na uszczelkę oraz nanokompozytowa uszczelka.

Korzystając ze stanowiska pomiarowego firmy Keithley wyznaczono przewodność elektryczną wytworzonej uszczelki, która wyniosła ok. 24 S/m. Na koniec dodatkowo zważono wykonaną skrzynkę oraz pokrywę. Masa pudełka wynosiła 1456 g, natomiast pokrywy - 318,1g.

Pomiary skuteczności tłumienia pola elektromagnetycznego

W celu wykonania pomiaru skuteczności tłumienia pola elektromagnetycznego zestawione zostało stanowisko pomiarowe w laboratorium kompatybilności elektromagnetycznej.

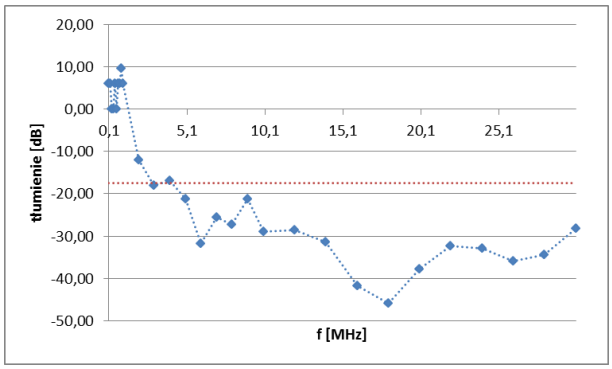


rys. 6 Generator sygnałowy Teseq NSG 4070 oraz sprzęgacz kierunkowy DCP 0100A.

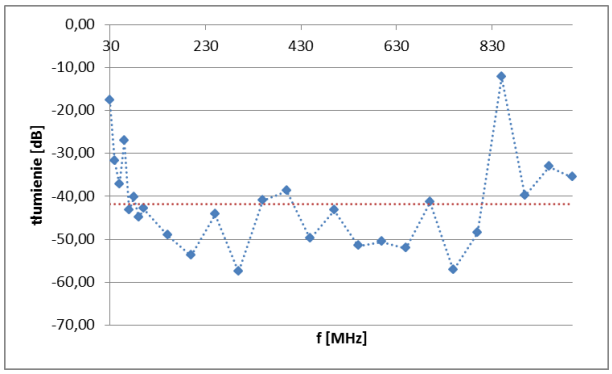
W jego skład wchodził generator sygnałowy NSG 4070 z dołączonym do wyjścia sprzęgaczem kierunkowym DCP 0100A oraz tłumikiem 6 dB (rys. 6). Poprzez wysokiej jakości przewód koncentryczny 50 Ω z końcówkami typu N sygnał z generatora doprowadzany był do anteny nadawczej pracującej w danym zakresie częstotliwości. W praktyce wykorzystane zostały dwie anteny: pętlowa EMCO 6509 dla zakresu 0,009 ÷ 30 MHz oraz logarytmiczno-periodyczna VULB 9168 dla zakresu 30 ÷ 1000 MHz. Dodatkowo pomiar dla górnego zakresu częstotliwości przeprowadzony został dla dwóch polaryzacji pola: pionowej i poziomej. Po stronie odbiorczej, do pomiaru natężenia pola elektromagnetycznego, wykorzystana została izotropowa sonda pola ETS-Lindgren HI-6122, której zakres pomiarowy wynosił 10 kHz – 1 GHz. Widok stanowiska przedstawiony jest na rys. 7.

Rys. 7 Konfiguracja izotropowej sondy pola oraz anteny emisyjnej w trakcie kalibracji oraz pomiarów tłumienia obiektu.

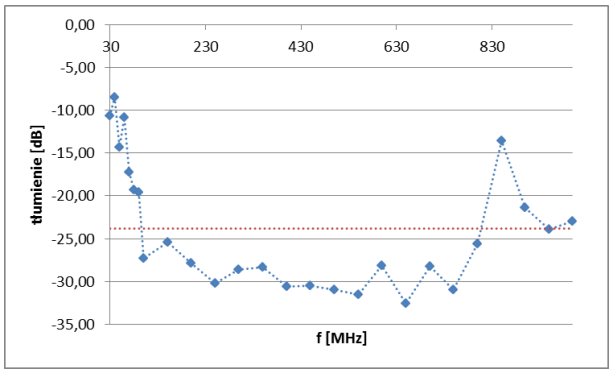
Dla każdej wybranej częstotliwości pomiar przeprowadzany był dwukrotnie: pierwszy raz z sondą umieszczoną w punkcie pomiarowym bez obudowy ekranującej i drugi raz z sondą umieszczoną wewnątrz obudowy wyposażonej w uszczelkę przewodzącą i pokrywę (rys. 7). Dla każdej serii pomiarowej dokonywany był także pomiar tła elektromagnetycznego celem naniesienia stosownej korekty na uzyskane wyniki pomiarów. Wykresy uzyskanych wyników w postaci tłumienia pola elektromagnetycznego przedstawione zostały na rysunkach 8 – 10. Kolorem niebieskim oznaczono wyniki pomiarów, zaś czerwona linia odzwierciedla średni ich poziom.



rys. 8 Wyniki pomiarów dla zakresu częstotliwości 0,1 ÷ 30 MHz (średnia: -17,46 dB)



rys. 9 Wyniki pomiarów dla zakresu częstotliwości 30 ÷ 1000 MHz w polaryzacji poziomej (średnia: -41,78 dB)



rys. 10 Wyniki pomiarów dla zakresu częstotliwości 30 ÷ 1000 MHz w polaryzacji pionowej (średnia: -23,82 dB)

Wartość skuteczności ekranowania została wyliczona na podstawie wzoru

$$S = 20log\frac{E_e}{E_b}\ [dB]$$

w którym E_e – zmierzona wartość natężenia pola bez obudowy, E_b – zmierzona wartość natężenia pola wewnątrz obudowy.

Weryfikacja numeryczna

W celu weryfikacji otrzymanych wyników przeprowadzona została seria obliczeń skuteczności tłumienia dla obu zakresów częstotliwości. Na bazie uzyskanych pomiarowo wartości konduktywności kompozytu oraz geometrii układu pomiarowego i wykorzystując podstawowe wzory przeprowadzone zostały następujące obliczenia. Dane podstawowe to:

- grubość kompozytu x=18 mm,
- przenikalność magnetyczna względna μ_r=1,
- konduktywność σ=24 S/m,
- odległość między anteną a sondą pola r=1 m.

W zakresie częstotliwości 0,1 – 30 MHz należało kolejno obliczyć impedancję falową pola [5, 6]:

$$Z_{wh} = 2\pi f \mu_0 r$$

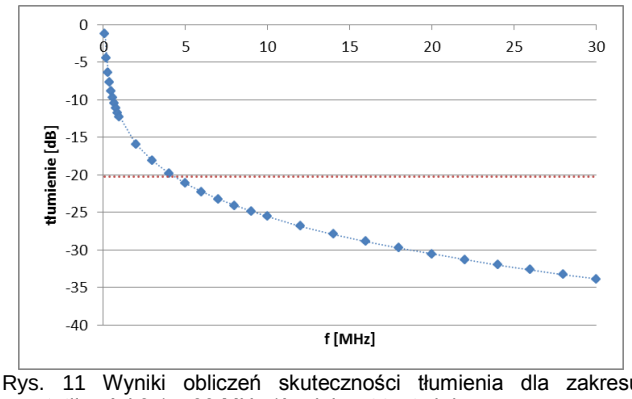
a następnie impedancję powierzchniową kompozytu

$$Z_s = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}},\quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

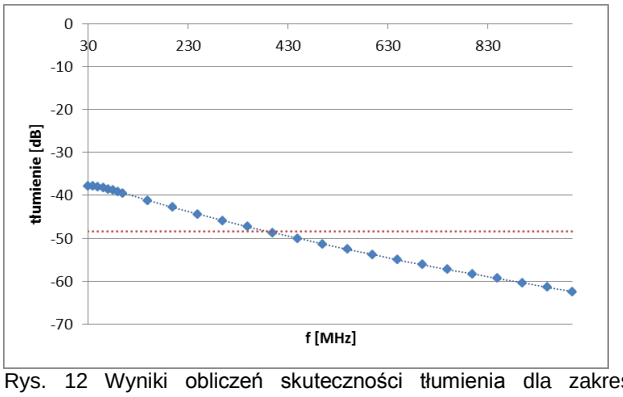
skąd skuteczność tłumienia:

$$SE = 20log\frac{Z_{wh}}{4Z_s} + 20loge^{\frac{x}{\delta}}$$

Na rys. 11 przedstawione zostały wyniki obliczeń.



Rys. 11 Wyniki obliczeń skuteczności tłumienia dla zakresu częstotliwości 0,1 ÷ 30 MHz (średnia: -20,19 dB).



Rys. 12 Wyniki obliczeń skuteczności tłumienia dla zakresu częstotliwości 30 ÷ 1000 MHz (średnia: -48,35 dB)

Dla zakresu częstotliwości 30 – 1000 MHz różnica w obliczeniach polegała głównie na wartości impedancji falowej – w tym przypadku równej 377 Ω. Wyniki obliczeń przedstawione zostały na wykresie na rysunku 12.

Podsumowanie i wnioski

W trakcie przeprowadzonych badań oraz na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż przedstawiony materiał kompozytowy w pewnym zakresie spełnia funkcję ekranującą pola elektromagnetycznego.

Średni poziom skuteczności ekranowania wyniósł około 42 dB (rys. 9). Wyraźnie jednak widać, iż w zakresie niskich częstotliwości i dominacji pola magnetycznego skuteczność ta zdecydowanie maleje. Średni poziom skuteczności ekranowania dla tego przypadku wyniósł około 18 dB (rys. 8). Uzasadnieniem tego zjawiska jest charakter materiału kompozytowego, którego parametry elektryczne wprowadzają niedopasowanie impedancyjne względem impedancji falowej pola elektrycznego i tym samym efekt odbicia fali. Ponieważ pole magnetyczne tłumione jest głównie przez zjawisko absorpcji stąd obserwowana niewielka skuteczność badanego elementu.

Na uwagę zasługuje również fakt, iż wpływ na poziom tłumienia miała polaryzacja pola elektromagnetycznego. Dla polaryzacji poziomej średni poziom tłumienia wyniósł około 42 dB (rys. 9), zaś dla pionowej około 24 dB (rys. 10). Powodem takiego stanu może być kierunkowy charakter ułożenia włókien węglowych, pomimo ich rotacji o 45° w procesie wytwórczym. Wykazując większy stopień ich nieuporządkowania można się spodziewać mniejszych różnić w skuteczności tłumienia obu tych konfiguracji.

Z porównania wyników otrzymanych drogą pomiarową oraz obliczeniową widać ich dużą zbieżność – większą niż w poprzednio wykonywanych badaniach paneli [2]. Różnice mogą być spowodowane nieszczelnościami między pokrywą, uszczelką i kompozytową obudową, ale również środowiskiem pomiarowym, które nie było w jakiś szczególny sposób ekranowane od innych rodzajów zaburzeń polowych ani też optymalizowane pod kątem ewentualnych odbić generowanego pola.

Praca było finansowana przez NCBiR w ramach projektu "Metody i sposoby ochrony i obrony przed impulsami HPM" realizowanego w ramach programu strategicznego "Nowe systemy uzbrojenia i obrony w zakresie energii skierowanej".

The work was supported by the Polish National Centre for Research and Development within the project „ Methods and ways of protection and defence against HPM impulses" pending within strategic project: „New weaponry and defense systems of directed energy".

***Autorzy**:*

dr inż. Konrad Sobolewski, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: Konrad.Sobolewski@ee.pw.edu.pl; mgr inż. Kamil Dydek, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa, e-mail: dydek.kamil@gmail.com .

LITERATURA

[1] Brandt A.M, Kajfasz S., Kompozyty betonowe siatko-fibro-polimerobetony, IPPT PAN Warszawa 1981

[2] Sobolewski K., Dydek K., Composite panels as electromagnetic fields shield, 17th Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE 2016), Baza WoS

[3] Dow Corning, Technical Data Sheet: Sylgard® 170 Silicone Elastomer, 13.01.2015 r.

[4] Nanocyl, Technical Data Sheet: NC7000™, 12.07.2016 r

[5] H. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 2009

[6] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility, 2nd Ed.*, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, 2006.