

doi:10.15199/48.2021.01.38

Material permittivity measurement with the use of HPM pulses

Abstract. In the work the method of the permittivity measurement of non-magnetic material has been presented. The method allows to derive investigation in the free-space condition with exposure to pulsed strong microwave field. Presented method is particularly useful to investigate absorbers intended to shield of the electronics against destructive influence of high power pulses HPM. In introduced method modules of S_{21} coefficients for two slabs of material with different thicknesses have to be measured.

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę pomiaru zespolonej przenikalności elektrycznej materiałów niemagnetycznych. Metoda pozwala prowadzić badania w wolnej przestrzeni w warunkach ekspozycji na silne impulsowe pola mikrofalowe. Metoda jest szczególnie przydatna do badań absorberów przeznaczonych do zabezpieczania elektroniki przed destrukcyjnym wpływem wysokomocowych impulsów HPM. W przedstawionej metodzie pomiarom podlegają dwa moduły współczynników S_{21} dla materiału o różnych grubościach. (Pomiary przenikalności elektrycznej materiałów z wykorzystaniem impulsów HPM)

Keywords: permittivity, HPM pulses, microwave absorbers.

Słowa kluczowe: przenikalność elektryczna, impulsy HPM, mikrofalowe absorbery.

Wprowadzenie

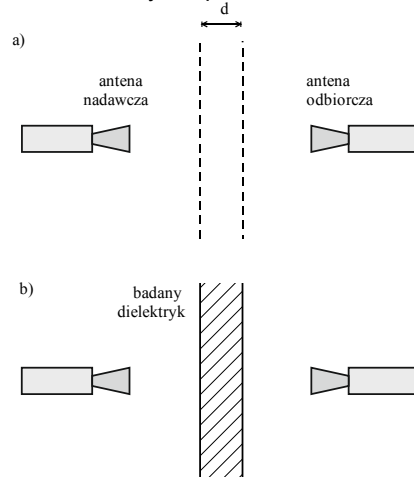
W związku z rozwojem urządzeń elektronicznych emitujących promieniowanie elektromagnetyczne istnieje potrzeba charakteryzowania elektrycznych własności materiałów lub ich komponentów. Scharakteryzowanie konstytutywnych własności materiałów jest niezbędne ale musi być ukierunkowane na określone aplikacje, w których materiał będzie użyty. Parametrem definiującym własności elektryczne jest względna zespolona przenikalność elektryczna. Szczególnie duże zapotrzebowanie na określenie własności elektrycznych występuje w przypadku materiałów zabezpieczających przed promieniowaniem elektromagnetycznym, czyli tak zwanych absorberów, których zadaniem jest pochłanianie energii elektromagnetycznej. Jest oczywiste, że absorbery powinny charakteryzować się dużą skutecznością pochłaniania energii padającej fali w szerokim zakresie częstotliwości. W takim przypadku badania przenikalności należy przeprowadzić w zakresie częstotliwości, co najmniej, odpowiadającym warunkom pracy takiego absorbera. Badania przenikalności elektrycznej materiałów w dziedzinie częstotliwości są dobrze opisane w literaturze, np. [1]. Jednakże trzeba podkreślić, że nie istnieje metoda uniwersalna takich pomiarów, a jej właściwy wybór jest gwarancją otrzymania wiarygodnych wyników. Wybór właściwej metody pomiarów jest uzależniony od wielu czynników, a między innymi: czy pomiary będą realizowane w zamkniętych torach falowodowych czy w otwartej przestrzeni; czy pomiary będą wąsko- czy szerokopasmowe i wreszcie czy badany materiał charakteryzuje się wysokimi wartościami przenikalności czy raczej niskimi. Odrębnym problemem jest dostosowanie techniki pomiarów do stanu skupienia materiału (ciecz, proszek, ciało stałe czy kompozyt). Pomiary w zamkniętych torach pomiarowych zapewniają najwyższy poziom dokładności pomiarów, pod warunkiem właściwego kalibrowania układu pomiarowego przed właściwymi pomiarami. Mimo wszystko dużą niedogodnością takich pomiarów jest fakt, że na badany materiał pada fala elektromagnetyczna o rozkładzie przestrzennym wynikającym z rodzaju fali propagującej się w danej przewodnicy falowej. Jedynie w przewodnicy współosiowej można uzyskać warunki fali TEM (z ang. Transverse Electromagnetic), jednakże w pobliżu przewodnika wewnętrznego należy spodziewać się dużych koncentracji natężenia pola elektrycznego, co w przypadku pracy z wysokimi wartościami natężenia może prowadzić do przebicia.

Metodami pozwalającymi na realizację pomiarów z wykorzystaniem padającej fali typu TEM są warunki wolnej

przestrzeni a badany materiał wykonany jest najczęściej w postaci płyty równoległościennnej. Dużą trudnością w uzyskaniu poprawnych pomiarów jest problem realizacji kalibracji w tak otwartych układach pomiarowych. W dodatku, aby uniknąć niepożądanych odbić od okolicznych przedmiotów pomiary takie powinno się wykonywać w bezodbiciowych komorach pomiarowych. Mimo wszystko, nawet w najlepszych komorach bezodbiciowych nie można całkowicie pozbyć się pasożytniczych odbić od podłogi czy ścian bocznych, nawet jeżeli są one wyłożone skutecznymi absorberami.

Specyfikacja techniki pomiarowej

Metody pomiarów przenikalności elektrycznej w dziedzinie czasu wykorzystują padającą falę elektromagnetyczną w postaci impulsu o krótkim czasie trwania. Taki impuls w dziedzinie częstotliwości składa się z szerokiego widma częstotliwości harmonicznych, co umożliwia jednoczesny pomiar współczynników macierzy rozproszenia dla wielu częstotliwości. Dodatkowo, zastosowanie techniki „okna” w dziedzinie czasu umożliwia „wycięcie” sygnałów odbitych od podłogi i ścian bocznych, dochodzących z określonymi opóźnieniami.

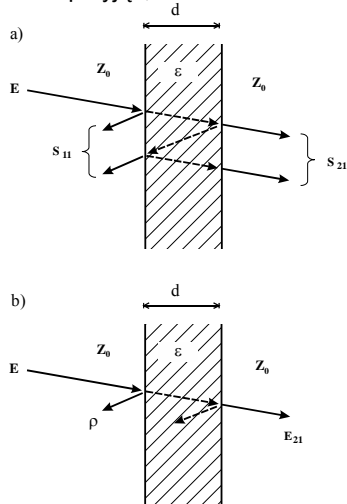


Rys. 1. Ilustracja schematyczna pomiaru w wolnej przestrzeni: a) bez badanego materiału, b) z badanym dielektrykiem

W pracy zaadaptowano metodę funkcji wtrąconej [2] a badany jednorodny i izotropowy materiał o grubości d był umieszczony pomiędzy anteną nadawczą oraz odbiorczą w bezodbiciowej komorze pomiarowej – rys.1.

W badaniach fala elektromagnetyczna typu TEM padała prostopadle do powierzchni badanego materiału. Badany materiał znajdował się pośrodku pomiędzy antenami nadawczą i odbiorczą, rozmieszczonymi na takiej odległości, która zapewnia warunki strefy dalekiej. W takim przypadku padającą falę można uznać za falę płaską.

Dzięki warunkom brzegowym na granicach „powietrze-dielektryk-powietrze” fala doznaje wielokrotnych odbić, jak przedstawiono na rys.2a. Fale odbite od materiału stanowią szereg geometryczny, którego suma jest współczynnikiem macierzy rozproszenia S_{11} . Z kolei suma fal przechodzących określa współczynnik S_{21} . Dla materiału izotropowego można przyjąć, że $S_{11} = S_{22}$ oraz $S_{21} = S_{12}$.



Rys. 2. a) Wielokrotne odbicia fali wewnątrz materiału, b) przyjęta do obliczeń fala bezpośrednia

Dla fali ciągłej lub o czasie trwania znacznie dłuższym od czasu propagacji fali (pojedynczego przejścia fali parcjalej) przez materiał zespolone współczynniki macierzy rozproszenia są określone poniższymi zależnościami [3, 4].

$$(1) \quad S_{11} = \rho \frac{1 - e^{-2\gamma d}}{1 - \rho^2 e^{-2\gamma d}}$$

$$(2) \quad S_{21} = \rho \frac{(1 - \rho^2) e^{-\gamma d}}{1 - \rho^2 e^{-2\gamma d}}$$

gdzie: ρ – odbicie na granicy „powietrze-dielektryk”,

$$(3) \quad \rho = \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}}$$

γ – zespolony współczynnik propagacji,

$$(4) \quad \gamma = j\omega\sqrt{\epsilon}$$

d – grubość płyty materiału.

W przypadku gdy czas pojedynczego przejścia fali przez warstwę materiału jest znacznie krótszy od czasu trwania impulsu wtedy stosując technikę okna w dziedzinie czasu można określić sygnał E_{21} . Taka postać sygnału jest znacznie prostsza i gwarantuje szybszą zbieżność w obliczeniach. W tym przypadku, biorąc pod uwagę określone grubości materiału, rzędu milimetrów lub centymetrów, należy zastosować bardzo krótkie impulsy o czasach nanosekundowych.

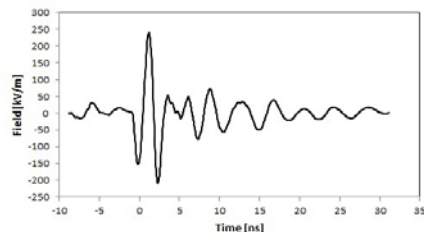
$$(5) \quad E_{21} = (1 - \rho^2) e^{-\gamma d}$$

W pracy technika przejścia pojedynczej fali parcjalej została zastosowana pomimo użycia impulsu o czasie trwania dłuższym od czasu przejścia fali przez materiał poprzez zastosowanie techniki okna do pozyskania tylko pierwszej części impulsu.

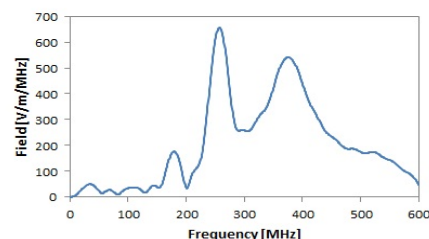
Charakterystyka impulsów HPM

Impulsy HPM (z ang. High Power Microwave) są promieniowaniem mikrofalowym charakteryzującym się ekstremalnie wysokimi natężeniami pola elektrycznego, rzędu setek kV/m oraz krótkimi czasami ich trwania, rzędu kilku nano- sekund. Takie impulsy mają szerokie widmo składowych harmonicznych. Na rys. 3 przedstawiono impuls HPM emitowany z generatora Marksa w dziedzinie czasu i częstotliwości.

a)



b)



Rys.3. Impuls HPM: a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości

Obecnie technika generacji impulsów HPM umożliwia wytwarzanie pól elektromagnetycznych o ekstremalnie wysokich natężeniach, co daje możliwości badania przenikalności elektrycznej materiałów w tak wysokich natężeniach. Technika ta będzie szczególnie przydatna w badaniach absorberów przewidzianych do zabezpieczania elektroniki przed negatywnym oddziaływaniem impulsów HPM.

Metoda pomiaru

Pomiary w zamkniętych torach pomiarowych (np. w falowodach) nie są predysponowane do pomiarów z wysokimi natężeniami pól, jednakże umożliwiają przeprowadzenie poprawnej kalibracji wszystkich elementów układu pomiarowego, zwłaszcza jeżeli pomiary realizowane są w dziedzinie częstotliwości. Kalibracja jest szczególnie niezbędna jeżeli pomiarom oprócz modułów będą podlegały również fazy współczynników macierzy rozproszenia.

W przypadku pomiarów w wolnej przestrzeni, prezentowane w literaturze metody kalibracji całego układu pomiarowego, są złożone i nie gwarantujące wystarczającej poprawności metrologicznej [5,6].

W pracy do pomiarów przenikalności elektrycznej opracowano metodę z wykorzystaniem pomiarów modułów współczynników macierzy rozproszenia. Pomiarom podlegała wartość współczynnika S_{21} . Mimo wszystko biorąc pod uwagę, że względna zespolona przenikalność elektryczna definiowana jest w postaci dwóch wielkości, a mianowicie przenikalności elektrycznej (część rzeczywista) oraz współczynnika strat (część urojona przenikalności) - zależność (4) - zatem do wyznaczenia tych wartości niezbędny jest pomiar dwóch wartości współczynnika S_{21} , wyznaczonych dla dwóch grubości mierzonych płyt.

$$(6) \quad \epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

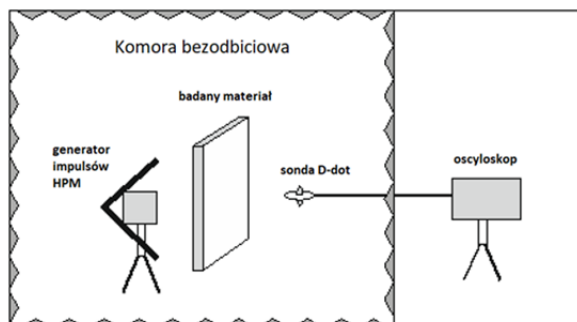
gdzie: ϵ' – część rzeczywista, ϵ'' – część urojona przenikalności

Po zastosowaniu okna w dziedzinie czasu do

$$(7) \quad E_{121} = (1 - \rho^2)e^{-\gamma d1}$$

$$(8) \quad E_{221} = (1 - \rho^2)e^{-\gamma d2}$$

Przedstawiona metoda z pomiarami modułów współczynnika S_{21} jest dużym ułatwieniem, a kalibrację można sprowadzić do pomiarów układu pomiarowego bez mierzonego dielektryka. Grubości płyt materiałów mogą być dowolne jednakże najlepsze wyniki można uzyskać gdy drugi pomiar jest realizowany dla podwójnej grubości, tj. $d2=2 \times d1$. Schemat układu pomiarowego z badanym dielektrykiem przedstawiono na rys.4.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego przenikalności elektrycznej badanego materiału o grubości d w bezodbiciowej komorze pomiarowej

Układ pomiarowy składał się z generatora Marksa, umożliwiającego wytworzenie natężenia pola elektrycznego do wartości 250 kV/m oraz sondy D-dot do rejestracji sygnału w dziedzinie czasu. Badany materiał umieszczany był pomiędzy anteną nadawczą i sondą pomiarową, a całość znajdowała się w bezodbiciowej komorze pomiarowej. Układ rejestracji i obróbki sygnałów znajdował się poza komorą.

Pomiary przeprowadzono dokonując pomiaru kalibracyjnego (bez badanego materiału), a następnie wykonując pomiary dla dwu grubości dielektryka. Wykorzystując pomiar kalibracyjny wyznaczono się transmitancję wolnej przestrzeni. Kolejno wyznaczono się transmitancję przy próbce grubości $d1$, a następnie przy próbce grubości $d2 = 2 \times d1$.

Dla grubości $d1$:

$$(9) \quad T_x S_0 = T_{y0}$$

$$(10) \quad T_x S_{21A} = T_{yA}$$

Dla grubości $d2$

$$(11) \quad T_x S_0 = T_{y0}$$

$$(12) \quad T_x S_{21B} = T_{yB}$$

gdzie: T_x – transformata sygnału padającego, S_0 – transmitancja pustego odcinka, S_{21A} – transmitancja odcinka z teflonem dla grubości $d1$, S_{21B} – transmitancja odcinka z teflonem dla grubości $d2$, T_{y0} – transmitancja sygnału zmierzonego bez materiału, T_{yA} – transmitancja sygnału zmierzonego z materiałem o grubości $d1$, T_{yB} – transmitancja sygnału zmierzonego z materiałem o grubości $d2$

Po przekształceniach zależności (9) – (12) otrzymuje się następujące wyrażenia na współczynniki transmitancji dla materiału o grubości $d1$ oraz $d2$.

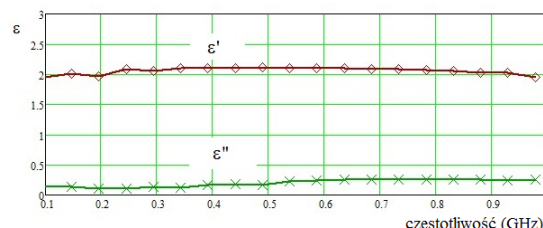
$$(13) \quad S_{21A} = S_0 \frac{T_{yA}}{T_{y0}}$$

$$(14) \quad S_{21B} = S_0 \frac{T_{yB}}{T_{y0}}$$

W pracy przeprowadzono badania 2 płyt o grubości $d1 = 4$ cm oraz o podwójnej grubości $d2 = 8$ cm. Przykładowe pomiary z wykorzystaniem metody przeprowadzono dla

teflonu, której przenikalność elektryczna jest znana, a mianowicie $\epsilon = 2,1 (\pm 0,2)$ - j $0,2 (\pm 0,2)$.

Rozwiązując układ równań (13) i (14) względem ϵ' oraz ϵ'' otrzymano wartości rzeczywistej i urojonej przenikalności elektrycznej w funkcji częstotliwości – rys.5.



Rys. 5. Wartości rzeczywistej i urojonej części przenikalności elektrycznej teflonu

Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę pomiaru zespolonej przenikalności elektrycznej materiałów niemagnetycznych. Metoda pozwala prowadzić badania w wolnej przestrzeni w warunkach ekspozycji na silne impulsowe pola mikrofalowe. Metoda jest szczególnie przydatna do badań absorberów przeznaczonych do zabezpieczania elektroniki przed destrukcyjnym wpływem wysokomocowych impulsów HPM. W przedstawionej metodzie pomiarom podlega współczynnik S_{21} dla materiału o dwóch grubościach. Pomiarom podlegają moduły tych współczynników a dzięki analizie w dziedzinie czasu otrzymuje się wartości zespolonej przenikalności elektrycznej w funkcji częstotliwości.

Przedstawiona metoda zostanie w przyszłości rozszerzona o pomiar materiałów również magnetycznych. W takim przypadku zarówno współczynnik S_{21} jak również S_{11} będą przedmiotem pomiarów

Praca była sponsorowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – projekt nr DOB-1-3/1/PS/2014

Authors: mgr inż. Karol Rudyk, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: karol.rudyk@wat.edu.pl; 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 hab. inż. Marek Kuchta, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: marek.kuchta@wat.edu.pl.

REFERENCES

- [1] Baker-Jarvis, J.; Janezic, M.D; Riddle, B.F; Johnj, R.T; Kabos, P.; Holloway, C.; Grosvenor, C.A.: Measuring the permittivity and permeability of lossy materials: solids, liquids, metals, building materials and negative-index materials, Natl. Inst. Stand. Technol., Technical Note, NIST, (2005).
- [2] Muqibel A.H., Safaai-Jazi A., A new formulation for characterization of materials based on measured insertion transfer function, IEEE Trans. Microwawe Theory Tech., (2003), vol. 51, pp. 1946-1951
- [3] Nicolson, A.M.; Ross, G.F.: Measurement of the intrinsic properties of materials by time domain techniques, IEEE Trans. Instrum. Meas., (1968), vol. 19, pp. 377-382.
- [4] Weir, W.B.: Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies, Proc IEEE, 62 (1974), pp. 33-36.
- [5] Ghodgaonkar D.K., Varadan V.V., Varadan V.k., A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies, IEEE Trans Instrument Measurement, (1989), vol. 37(3), pp. 789-793.
- [6] Umari M.H., Ghodgaonkar D.K., Varadan V.V., Varadan V.k., A free-space bistatic calibration technique for the measurement of parallel and perpendicular reflection coefficients of planar samples, IEEE Trans Instrument Measurement, (1991), vol. 40(1), pp. 19-24.