

## Elastyczne materiały stosowane w technice ekranowania pola elektromagnetycznego

*Streszczenie.* W prezentowanym artykule przedstawiono wyniki badań efektywności ekranowania pola elektromagnetycznego (SE) dla metalizowanych, elastycznych kompozytów wykorzystujących włókninę polipropylenową (PP). Metaliczne warstwy (Cu-Zn, Ti, NiO) nakładano metodą impulsowego rozpylania magnetronowego. Najwyższe wartości SE ( $\geq 55$  dB) uzyskano dla kompozytów PP/Cu-Zn. Dla naprzemiennie nakładanych metalicznych warstw Cu-Zn i Ti nie stwierdzono wpływu starzenia środowiskowego na wartość SE.

**Abstract.** The article presents the results of research on the effectiveness of electromagnetic field (SE) screening for metalized, flexible composites using polypropylene nonwoven (PP). Metallic layers (Cu-Zn, Ti, Ni) were applied by pulsed magnetron sputtering. The highest SE values ( $\geq 55$  dB) were obtained for PP / Cu-Zn composites. For the alternately applied Cu-Zn and Ti metallic layers, no effect of environmental aging on the SE value was found. (**Flexible materials used in electromagnetic field shielding**).

**Słowa kluczowe:** skuteczność ekranowania, rozpylanie magnetronowe, pole elektromagnetyczne, starzenie.

**Keywords:** electromagnetic shielding efficiency, magnetron sputtering, electromagnetic field, ageing.

### Wstęp

Wyroby tekstylne (włókniny, tkaniny, dzianiny) znajdują coraz większy zakres zastosowań. W ostatnich latach obserwuje się duże zainteresowanie tekstroniką. Tekstronika jest dziedziną równocześnie wykorzystującą wyroby włókiennicze i zminiaturyzowaną elektronikę [1-4]. Dziedzina ta w ostatnich latach jest intensywnie rozwijana. Materiały te wykorzystuje się w projektowaniu i produkcji inteligentnych ubrań rekreacyjnych i sportowych zwiększających komfort i bezpieczeństwo użytkownika.

Materiały tekstylne charakteryzujące się dużą elastycznością, małą masą właściwą, przepuszczalnością powietrza i wody oraz odpornością na narażenia środowiskowe (temperatura, wilgotność) znajdują zastosowanie w elementach zabezpieczających przed szkodliwym działaniem pola elektromagnetycznego [5-7]. To zagadnienie jest bardzo istotne ze względu na coraz większą liczbę i moc zainstalowanych źródeł promieniowania elektromagnetycznego. Dlatego ochrona ludzi, urządzeń elektronicznych oraz elektroenergetycznych jest bardzo ważna.

Materiały stosowane w technice ekranowania pola elektromagnetycznego (PEM) muszą charakteryzować się również dużymi wartościami współczynnika ekranowania, jednorodnością, elastycznością, trwałością i niskimi kosztami produkcji. Niezbędna jest także ich odporność na szkodliwe działanie zewnętrznego środowiska (utlenianie, korozja). Dlatego też ekrany wykonane w postaci metalizowanych wyrobów włókienniczych wydają się być optymalne. Posiadają dużą wartość współczynnika SE, ale jak wykazały badania, pokrycia metalowe ulegają degradacji w podwyższonej temperaturze i wilgotności [8].

W związku z tym poszukuje się nowych rozwiązań technologicznych zwiększających odporność materiałów ekranujących. Takim rozwiązaniem mogą być elastyczne kompozyty wykonane w postaci włóknin polipropylenowych, pokrytych metalami lub naprzemiennie nakładanymi warstwami metalicznymi lub tlenkowymi charakteryzującymi się zwiększoną odpornością na czynniki zewnętrzne. Takimi metalami mogą być: mosiądz, nikiel lub tytan. Pomimo, że mają większą rezystywność  $\delta$  niż miedź czy srebro, to otrzymywane wartości współczynników ekranowania pola elektromagnetycznego są zadawalające [8].

### Technologia otrzymywania elastycznych materiałów ekranujących PEM

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań skuteczności ekranowania oraz jej zmiany pod wpływem

narażeń starzeniowych, dla włóknin polipropylenowych pokrytymi warstwami mosiądzu (Cu-Zn), tytanu (Ti) i niklu (Ni). Warstwy nakładano metodą rozpylania magnetronowego. Metoda ta polega na bombardowaniu powierzchni elektrody rozpylanej (targetu) przez wysokoenergetyczne jony gazów roboczych. Jony wybijają atomy lub cząstki materiału z powierzchni targetu, które następnie są osadzane na podłożach. W polu elektrycznym i magnetycznym jony gazów roboczych nabywają bardzo dużą energię kinetyczną, dzięki czemu pozwalają uzyskać dużą szybkość rozpylania i osadzania warstw, która dla metali wynosi kilka  $\mu\text{m}/\text{min}$ , a dla warstw dielektrycznych jest rzędu 10-100 nm/min.

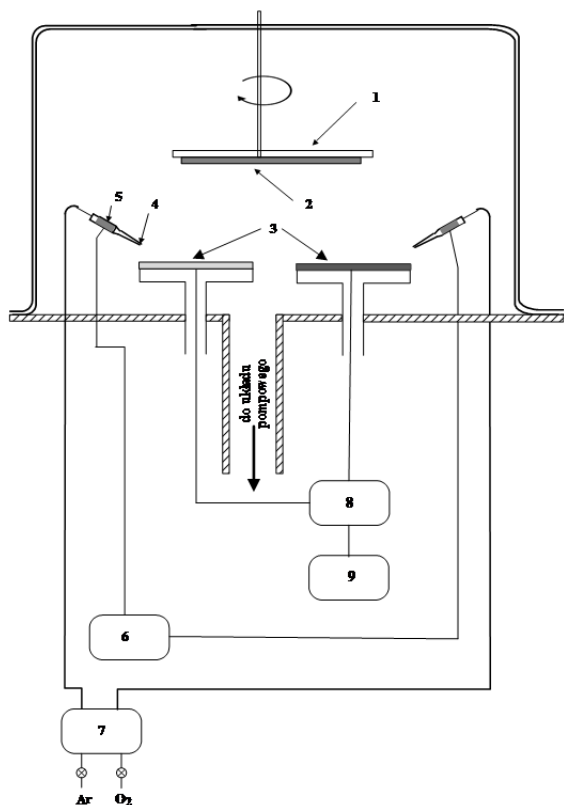
Klasyczna metoda rozpylania magnetronowego polega na utrzymywaniu stałego ciśnienia gazów roboczych podczas procesu rozpylania. Ciśnienie gazów jest na poziomie  $5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-1}$  Pa. Wybite atomy tracą swoją energię na jonach gazu, co może być przyczyną utraty adhezji warstw do podłoża. Dlatego Autorzy zaproponowali modyfikację metody rozpylania, wprowadzając impulsowe dozowanie gazów bezpośrednio nad powierzchnię targetu (rys. 1). Takie rozwiązanie umożliwia zastosowanie dużych gęstości mocy wydzielanych na tarcie, a więc zwiększenie szybkości nakładania warstw. Ponieważ proces rozpylania trwa tylko w momencie wstrzyknięcia określonej objętości gazu, nie występuje ryzyko uszkodzenia rozpylanej elektrody lub układu magnetycznego. Z obszaru pomiędzy wyrzutnią a podłożem wypompowywany jest gaz roboczy. Dlatego też wybite atomy nie tracą swojej energii na jonach gazu i mogą dyfundować w głąb materiału podłoża. Pokrywane są nawet włókna wewnętrzne tekstylnych podłoży. Powoduje to również zwiększenie przyczepności nakładanych warstw do powierzchni wyrobów tekstylnych.

Elastyczne kompozyty PP/Me otrzymywano wykorzystując wyrzutnie magnetronowe typu WMK-100 oraz WMK-50. Targety wykonane były ze stopu mosiądzu  $\text{MO}_{58}$  (58%Cu, 40%Zn, 2%Pb), Ti (o czystości 99,5%) i Ni (o czystości 99,5%). Na podłoża wyselekcjonowano ogólnie dostępną i względnie taną włókninę polipropylenową (PP) o gramaturze 150 g·cm<sup>-2</sup>.

Wyrzutnie magnetronowe podłączone były poprzez przerzutnik (8 na rys. 1) z impulsowym źródłem prądowym o maksymalnej mocy 16 kW firmy Dora Power System (9 na rys. 1). Przerzutnik był przystosowany do podziału mocy oraz czasu rozpylania poszczególnych targetów. Takie rozwiązanie umożliwia rozpylanie pojedynczego targetu lub

dwóch targetów jednocześnie. Pozwala również na otrzymywanie warstw o zadanym stosunku wagowym np. Cu-Zn/Ti lub naprzemienne nakładanie poszczególnych metali lub ich tlenków np. Ni/NiO/Ni lub Cu-Zn/Ti/Cu-Zn. Czasy rozpylania Cu-Zn i Cu-Zn/NiO ustalono odpowiednio na 10 i 5 min. Dla powłok wykonanych z Cu-Zn i Ti częstotliwość przełączania wyrzutni magnetronowych wynosiła 1 Hz.

Czasy rozpylania poszczególnych wyrzutni można regulować od 0,1 s do 20 minut. Gazy robocze, poprzez mieszalnik (7 na rys. 1.) podawane były do piezoelektrycznego dozownika (5) połączonego z kapilarą (4). Objętość wstrzykiwanego gazu sterowano układem impulsowego dozowania gazem (6), który pozwalał na impulsowe wstrzykiwanie gazów z regulowaną częstotliwością od 0,5 Hz do 2 kHz i czasem otwarcia zaworu od 0,01 s do 0,1 s. Parametry procesu rozpylania przedstawiono w tabeli 1.



Rys.1. Schemat układu nakładania metalicznych powłok na materiały włókiennicze, 1 – obrotnica, 2 – włóknina, 3 – wyrzutnie magnetronowe, 4 – kapilara wstrzykująca gaz roboczy, 5 – dozownik piezoelektryczny, 6 – układ impulsowego dozowania gazów, 7 – układ mieszania gazów, 8 – przerzutnik zasilania wyrzutni magnetronowych, 9 – impulsowe źródło prądowe zasilające wyrzutnie magnetronowe

Tabela 1. Parametry procesu rozpylania

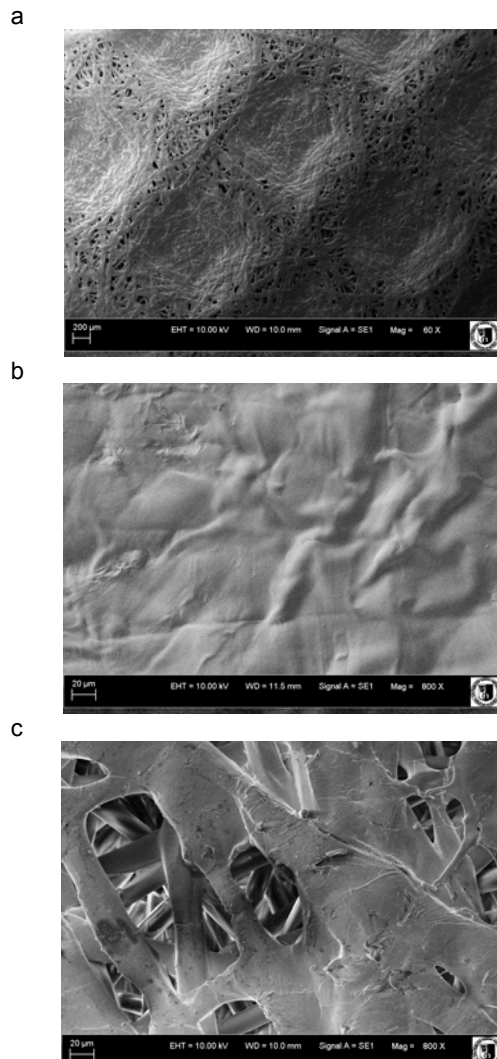
Parametry	Materiał		
	Cu-Zn	NiO	Ti
Ciśnienie Ar, [Pa]	0,015	0,02	0,02
Ciśnienie O <sub>2</sub> , [Pa]		0,015	
Moc, [W]	320	800	750
Moc krążąca, [W]	10	50	52
Prąd, [A]	1,37	0,65	0,48
Częstotliwość, [Hz]	2500	2500	2000
Odległość target-podłoże, [m]	0,15	0,15	0,15
Czas, [min.]	10	5	5

Badania starzeniowe otrzymanych ekranów kompozytowych wykonano w komorze klimatycznej typu Espec PL-1KPH o objętości 0,12 m<sup>3</sup> dla wilgotności

względnej RH=90%. Próbkę starzono w dwóch temperaturach 23 °C i 90 °C. Łączny czas starzenia wynosił 336 h.

### Pomiary współczynnika skuteczności ekranowania

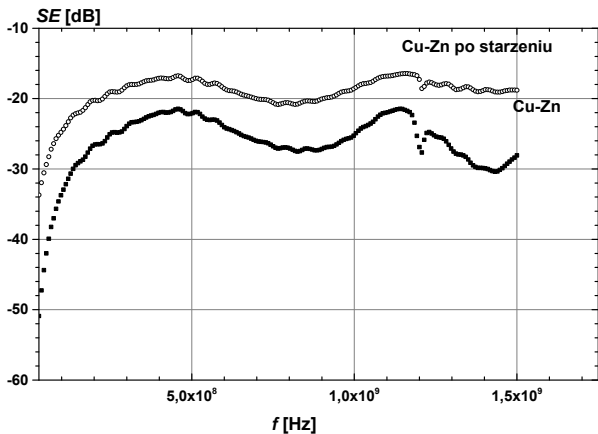
Morfologię powierzchni otrzymanych materiałów ekranujących zbadano mikroskopem elektronowym. Rys. 2 przedstawia przykładową morfologię powierzchni metalicznych warstw Cu-Zn. Zaobserwować można, że rozpylany materiał osadza w miarę równomiernie na powierzchni włókniny PP (rys. 2a). Również obszary pomiędzy punktami zgrzewania pokryte są równomierną metaliczną warstwą Cu-Zn (rys. 2b). Badania te wykazały, że rozpylony materiał osadza się również na powierzchni włókien znajdujących się wewnątrz włókniny, co powoduje zwiększenie wartości współczynnika ekranowania PEM (rys. 2c).



Rys.2. Morfologia powierzchni warstw Cu-Zn naniesionych na włókninę PP, a – powiększenie x80, b – powiększenie x 800 dla obszaru pomiędzy punktami zgrzewania, c – powiększenie x800 dla punktu zgrzewania

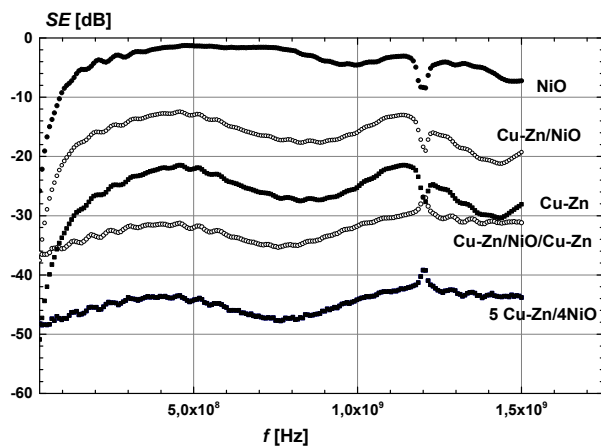
Pomiary skuteczności ekranowania zrealizowano zgodnie z metodą ASTM D4935- 99. Układ pomiarowy składał się z analizatora Agilent E5061A ENA- L oraz adaptera pomiarowego. Błąd pomiarowy urządzenia wynosił 2 dB. Badane właściwości ekranujące obejmowały zakres promieniowania od 30 MHz do 1500 MHz. Skuteczność ekranowania określana jest, jako różnica pomiędzy transmitancją lub tłumieniem próbki referencyjnej i próbki badanej.

Przykładowe wyniki badań współczynnika tłumienności pola elektromagnetycznego SE dla otrzymanych ekranujących kompozytów przedstawiono na rysunkach od 3 do 7. Można zauważyć, że ekrany wykonane tylko z mosiądku, przed starzeniem mają średnią wartość SE na poziomie około 25 dB (rys. 3) przy rezystywności powierzchniowej wynoszącej  $\rho=25 \Omega$ . Wartość współczynnika tłumienia można zwiększyć nawet powyżej 55 dB, poprzez zwiększenie grubości warstwy Cu-Zn. Podobne wyniki były prezentowane dla pokryć Zn-Bi [9]. W wyniku procesu starzenia ekrany narażone są na działanie wilgoci i podwyższonej temperatury, które powodują powstawanie procesów korozyjnych. Objawia się to obniżeniem wartości SE o kilka dB. Różnice pomiędzy SE dla próbek niestarzonych i starzonych zwiększają się wraz ze zwiększaniem częstotliwości.



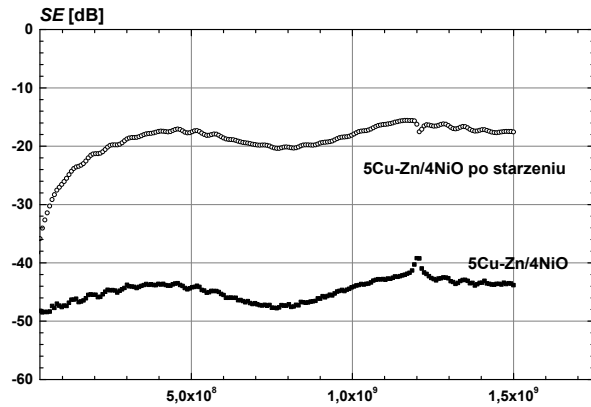
Rys.3. Zależność współczynnika tłumienia SE od częstotliwości  $f$  dla niestarzonych i starzonych warstw Cu-Zn

W celu zwiększenia wartości współczynnika ekranowania przetestowano również pokrycia kompozytowe złożone z naprzemiennie nałożonych warstw Cu-Zn i NiO. Stwierdzono, że zwiększanie liczby warstw powoduje zwiększenie wartości SE (rys. 4).

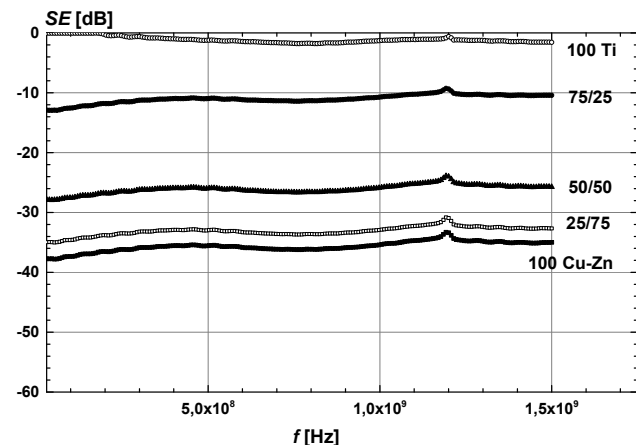


Rys.4. Skuteczność ekranowania SE w funkcji częstotliwości  $f$  dla różnych warstw Cu-Zn i NiO

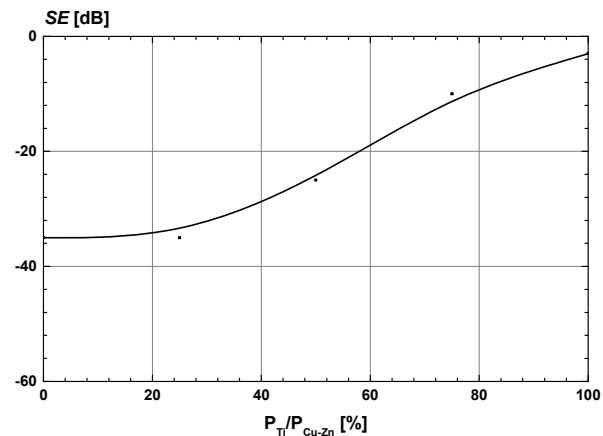
Jest to efektem tego, że całkowita grubość tych warstw jest większa niż pojedynczego mosiężnego pokrycia oraz to, że NiO jest materiałem przewodzącym, co skutkuje większą wartością współczynnika tłumienia PEM, która jest na poziomie 45 dB dla kompozytu złożonego z pięciu warstw Cu-Zn i 4 warstw NiO. Jednak różnice w wartościach SE dla próbek niestarzonych i starzonych są dużo większe. Szczególnie jest to widoczne w przypadku kompozytu złożonego z pięciu warstw Cu-Zn i 4 warstw NiO (rys. 5).



Rys.5. Zależność współczynnika tłumienia SE od częstotliwości  $f$  dla niestarzonych i starzonych warstw kompozytów 5Cu-Zn/4NiO



Rys.6. Zależność współczynnika tłumienia SE od częstotliwości  $f$  dla niestarzonych i starzonych warstw kompozytów 5Cu-Zn/Ti



Rys.7. Zależność współczynnika tłumienia pola EM dla kompozytów PP/Cu-Zn-Ti w funkcji stosunku mocy wydzielonych na targetach

Wieloskładnikowe warstwy złożone z mieszaniny mosiądku i tytanu uzyskano stosując podział mocy wydzielanych na poszczególnych targetach Cu-Zn i Ti w następujących proporcjach  $P_{Ti} / P_{Cu-Zn} = 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, 100/0$ . Umożliwiło to uzyskanie warstw o różnych składach atomowych. Zwiększanie zawartości Ti w otrzymanych warstwach skutkuje zwiększeniem rezystywności powierzchniowej kompozytów od  $\rho=25 \Omega$  do  $\rho=5 \text{ k}\Omega$ . Również współczynnik ekranowania zmienia się od 35 dB (Cu-Zn) do około 5 dB (czysty Ti) (rys. 6). Stwierdzono, że  $P_{Ti} / P_{Cu-Zn} < 25$  wartość SE obniża się tylko o kilka dB w porównaniu do testowej warstwy mosiądku (rys. 7).

Badania starzeniowe wykazały, że wartość współczynnika ekranowania warstw Cu-Zn zawierających tytan nie ulega zmianie. Wykonane pomiary mieszczą się w granicach błędów pomiarowych. W tabeli 2 przedstawiono przykładowe wartości SE otrzymanych kompozytów na bazie włókien polipropylenowych przed i po starzeniu w komorze klimatycznej dla wybranych częstotliwości (750 oraz 1300 MHz).

Tabela 2. Porównanie skuteczności ekranowania kompozytowych ekranów przed i po starzeniu w komorze klimatycznej

Skład	Przed starzeniem		Po starzeniu	
	f [MHz]		f [MHz]	
	750	1300	750	1300
Ni	-20,1	-16,0		
Ni/NiO/Ni	-27,8	-25,3	-26,4	-23,4
5Ni/4NiO	-26,1	-25,9		
Cu-Zn	-26,8	-27,1	-20,6	-19,6
Cu-Zn/NiO/Cu-Zn	-35,3	-30,3		
5Cu-Zn/4NiO	-47,7	42,6	-22,5	-19,6
Ti/Cu-Zn				
0/100	36,2	34,9	-35,8	-33,9
25/75	-33,7	-32,3	-33,5	-32,1
50/50	-26,6	-25,5	-26,5	-25,1
75/25	-11,4	-10,4	-11,2	-10,3

### Wnioski

Materiały kompozytowe ekranujące pole elektromagnetyczne wykonane w postaci metalizowanych mosiądzem polipropylenowych włókien charakteryzujące się wysokimi współczynnikami tłumienia ( $SE=30 - 50$  dB) są bardzo wrażliwe na zewnętrzne warunki środowiskowe. Dlatego też powinny być zabezpieczane dodatkowymi warstwami ochronnymi, nawet kosztem obniżenia współczynnika SE.

Również kompozyty wykonane z naprzemiennie osadzonych warstw Cu-Zn i NiO są bardzo wrażliwe na działanie podwyższonej temperatury i wilgotności. Skuteczność ich ekranowania po starzeniu może się obniżyć o 50%, co może być głównym ograniczeniem w ich zastosowaniu.

Idealnym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie mieszaniny mosiądzu i tytanu, jako warstwy zabezpieczającej. Stwierdzono, że wartość SE zależy od zawartości Ti w warstwach Cu-Zn, którą można zmieniać poprzez stosunek mocy wydzielanych na targetach mosiężnych i tytanowych. Dla stosunku  $P_{Ti} / P_{Cu-Zn}$  mniejszego od 25 nie powoduje pogorszenia właściwości ekranujących ( $SE=33,7$  dB). Powyżej tej wartości, ze względu na dużo większą wartość rezystywności Ti, wartość współczynnika ekranowania ulega zmniejszeniu. Wykonane

badania tego typu kompozytów nie wykazały znaczącego wpływu warunków starzenia ( $T=90$  °C,  $RH=90\%$ ,  $t=336$  godz.) na zmianę właściwości ekranujących oraz wartości SE. Jest wysoce prawdopodobne, że tego rodzaju ekranujące PEM materiały mogą stanowić dużą konkurencję w stosunku do klasycznych rozwiązań.

*Praca wykonana w ramach badań statutowych Katedry Postaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej.*

**Autorzy:** dr hab. inż. Jan Ziąja, E-mail: [jan.ziaja@pwr.edu.pl](mailto:jan.ziaja@pwr.edu.pl), dr inż. Maciej Jaroszewski, E-mail: [maciej.jaroszewski@pwr.edu.pl](mailto:maciej.jaroszewski@pwr.edu.pl), dr inż. Marcin Lewandowski, E-mail: [marcin.lewandowski@pwr.edu.pl](mailto:marcin.lewandowski@pwr.edu.pl), mgr inż. Maciej Sasuła, E-mail: [maciej.sasula@pwr.edu.pl](mailto:maciej.sasula@pwr.edu.pl), Politechnika Wroclawska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

### LITERATURA

- [1] Korzeniowska E, Józwick J, Krawczyk A, Michałowska., Odporność warstw metalicznych stosowanych w systemach tektonicznych na deformacje mechaniczne, Przegląd Elektrotechniczny, 93 (2018), nr.12, 111-114
- [2] Korzeniowska E., Duraj A., Krawczyk A. Identyfikation of sensor dysfunctions of organism by e-fiber monitoring, in Polish Przegląd Elektrotechniczny, 89 (2013), nr. 12, 123-127
- [3] Stoppa, M.; Chiolerio, A. Wearable electronics and smart textiles: A critical review. Sensors 2014, 14, 11957–11992
- [4] Pawlak R., Korzeniowska E., Koneczny C., Hałgas B., Properties of conductive structures produced by PVD method on a textile composite, Autex Research Journal, Vol. 17, No 3, September 2017, DOI: 10.1515/aut-2017-0015
- [5] Jaroszewski M., Pospieszna J., Ziąja J., Dielectric properties of polypropylene fabrics with carbon plasma coatings for applications in the technique of electromagnetic field shielding, Journal of Non-Crystalline Solids, (2010), n. 356, 625–628
- [6] Perumalraj B. S., Dasaradan B. S., Electromagnetic shielding effectiveness of doubled copper-cotton yarn woven materials, Fibres & Textiles in Eastern Europe (2010), vol. 18, n. 3 (80), 74-80
- [7] Sarto M. S., Tamburrano A., Innovative Test Method for the Shielding Effectiveness Measurement of Conductive Thin Films in a Wide Frequency Range, IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, (2006), vol. 48, n. 2, 331-341
- [8] Ziąja j., Krawczyk k, Badania wpływu temperatury i wilgotności na rezystywność powierzchniową materiałów kompozytowych ekranujących pole elektromagnetyczne, Przegląd Elektrotechniczny, 89 (2013), nr. 7, 321-323
- [9] Ziąja J, Koprowska J and Janukiewicz J Using Plasma Metallisation for Manufacture of Textile Screens Against Electromagnetic Fields, Fibres & Textiles in EE, 66(2008), vol. 16(5), 64-66