

Załącznik nr 2

## **Autoreferat**

Maciej Jaroszewski

Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny

Wrocław, 2018

Autoreferat przygotowany w oparciu o wzór Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów

# AUTOREFERAT

## 1. Imię i nazwisko

**Maciej Jaroszewski**

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- mgr inż., specjalność: technologia elektrotechniczna, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, 1993,
- dr, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, 1999, Tytuł rozprawy: *Wpływ wybranych narażeń na warystory beziskiennikowych ograniczników przepięć wywołanych oddziaływaniem zabrudzeń na osłonę ochronnika.*
- Studium podyplomowe *Business Studies*, Centrum Kształcenia Ustawicznego Politechniki Wroclawskiej i Central Connecticut State University, New Britain, Connecticut, 1998-1999.

## 3. Dotychczasowe zatrudnienie w jednostkach naukowych

- od 1-10-1997 do 31-09-2001, asystent naukowo-dydaktyczny, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny,
- od 1-10-2001 -, adiunkt naukowo-dydaktyczny, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny.

## 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.)

### a) Tytuł osiągnięcia naukowego:

Jednotematyczny cykl publikacji pt.

***Właściwości kompozytów włóknina polimerowa – cienkowarstwowe pokrycia, w aspekcie ekranowania pola elektromagnetycznego.***

### b) Autor/Autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa:

H1. Ziaja J., Pospieszna J., **Jaroszewski M.**, Szafran G., Koprowska J.: *Włókniny polipropylenowe z węglowym pokryciem plazmowym w technice ekranowania pola EM.* Przegląd Elektrotechniczny, 2008, R. 84, nr 10.  
MNiSW: 9 pkt., cytowania: 1 wg. Google Scholar

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:*

*współudziale w powstaniu koncepcji ekranów włókienniczych z modyfikowaną plazmowo powierzchnią, współudziale w koncepcji zastosowania warstw węglowych w kompozytach*

ekranujących, współdziałale w zaplanowaniu badań wstępnych przedstawionych w artykule, współdziałale w redakcji artykułu.

Mój udział procentowy szacuję na 20 %.

- H2. **Jaroszewski M.**, Pospieszna J., Ziaja 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, vol. 356, nr 11-17.

IF - 01.492, MNiSW: 32 pkt., cytowania: 5 (8 wg. Google Scholar)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji artykułu dotyczącego:

- określenia wpływu parametrów technologicznych nakładania pokryć cienkowarstwowych oraz morfologii powierzchni na właściwości dielektryczne otrzymanego kompozytu, mierzone w szerokim paśmie częstotliwości,

- możliwości zastosowania aproksymacji Havriliak-Negami (H-N) do kontroli i optymalizacji procesu otrzymywania warstw plazmowych.

Mój wkład to także przygotowaniu planu i zakresu badań, wykonanie badań metodą spektroskopii impedancyjnej, przeprowadzenie symulacji związanych z wyznaczeniem parametrów H-N, analiza i interpretacja wyników badań, opracowanie wniosków, napisanie i opracowanie redakcyjne manuskryptu.

Mój udział procentowy szacuję na 33,33%.

- H3. Pospieszna J., **Jaroszewski M.**, Bretuj W., Tchórzewski M.: *Wpływ rezystancji powierzchniowej i skrośnej na właściwości dielektryczne kompozytowego układu - włóknina polipropylenowa PP z węglowym pokryciem plazmowym*. Przegląd Elektrotechniczny, 2010, R. 86, nr 5.

IF - 00.242, MNiSW: 13 pkt.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji artykułu dotyczącego wpływu rezystywności powierzchniowej oraz skrośnej na właściwości dielektryczne kompozytu barierowego, przygotowanie zakresu merytorycznego i szczegółowego planu badań, opracowanie metodyki oceny wpływu procesu technologicznego i rodzaju powierzchni na podstawie wyznaczonej rezystywności oraz pomiaru pojemności zespolonej w szerokim paśmie częstotliwości, współdziałale w pomiarach rezystancji, wykonaniu pomiarów pojemności zespolonych w szerokim paśmie częstotliwości, analizie i interpretacji wyników badań, współdziałale w pisaniu manuskryptu, opracowaniu wniosków, opracowaniu redakcyjnym artykułu.

Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- H4. Pospieszna J., **Jaroszewski M.**, Szafran G.: *Wpływ podłoża na właściwości dielektryczne plazmowych pokryć węglowych*. Przegląd Elektrotechniczny. 2010, R. 86, nr 11b.

IF - 00.242, MNiSW: 13 pkt.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji merytorycznej artykułu dotyczącej określenia wpływu materiału podłoża oraz jego porowatości na właściwości dielektryczne kompozytu barierowego, opracowaniu koncepcji i zakresu prac badawczych, zaplanowaniu doświadczeń, współdziałale w pomiarach rezystancji, wykonaniu pomiarów pojemności zespolonych w szerokim paśmie częstotliwości, analizie i interpretacji wyników badań, opracowaniu wniosków wynikających z badań, współdziałale w pisaniu manuskryptu, opracowaniu redakcyjnym artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

- H5. Ziaja J., **Jaroszewski M.**: *EMI shielding using composite materials with plasma layers*.

W: Electromagnetic waves / ed. by Vitaliy Zhurbenko. Rijeka : InTech, 2011. ISBN 978-953-307-304-0

11045 pobrań (<https://www.intechopen.com/statistics/16092>; 09-03-2018)

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w opracowaniu koncepcji badań i zakresu tematycznego całego rozdziału, na zaplanowaniu prac badawczych zmierzających do określenia wpływu składu nakładanej warstwy, jej utlenienia i sposobu uwarstwienia, parametrów procesu technologicznego na rezystywność powierzchniową, skuteczność ekranowania oraz na ich odpowiedź dielektryczną. Moim wkładem jest także współudział w wykonaniu kompozytów ekranujących, współudział w pomiarach rezystancji, wykonanie pomiarów metodą spektroskopii dielektrycznej w szerokim paśmie częstotliwości, wykonanie pomiarów skuteczności ekranowania, analiza i interpretacja wyników badań skuteczności ekranowania i właściwości dielektrycznych w szerokim paśmie częstotliwości, współudziale w pisaniu manuskryptu, opracowanie podrozdziału opisującego zastosowanie spektroskopii impedancyjnej do oceny wytworzonych kompozytów, opracowanie redakcyjne artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 50%.*

- H6. Pospieszna J., **Jaroszewski M.**, Henrykowski A., Szafran G.: *Wpływ parametrów procesu plazmowego nanoszenia pokryć węglowych na włókninę polipropylenową na formy otrzymywanych struktur węglowych*. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, R. 88, nr 5a.  
MNiSW: 15 pkt.

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w opracowaniu koncepcji badań i zaplanowaniu doświadczeń, współudziale w wykonaniu kompozytów ekranujących, współudziale w analizie i interpretacji wyników badań, opracowaniu wniosków, współudziale w pisaniu manuskryptu, opracowanie redakcyjne artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 50%.*

- H7. **Jaroszewski M.**, Pospieszna J., Ziaja J., Ozimek M.: *Composites made of polypropylene nonwoven fabric with plasma layers*. W: Polypropylene / ed. by Fatih Dogan. Rijeka : InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0636-4  
2761 pobrań (<https://www.intechopen.com/statistics/37244>; 09-03-2018)

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji merytorycznej całego rozdziału oraz zakresu prac naukowo-badawczych, zaplanowaniu i koordynacji prac laboratoryjnych, współudziale w wykonaniu kompozytów ekranujących, współudziale w badaniach morfologii i struktury powierzchni, analizie i interpretacji wyników badań, współudziale w napisaniu manuskryptu, opracowaniu redakcyjnym kompletnego rozdziału. Mój udział procentowy szacuję na 55%.*

- H8. **Jaroszewski M.**: *Dielectric characterization of electromagnetic composite barrier materials with plasma layers on nonwoven fabrics*. Composite Interfaces 2012, vol. 19, nr 3-4.  
IF - 00.628, MNiSW: 25 pkt., cytowania: 1

*Mój udział procentowy wynosi 100%.*

- H9. Ozimek M., **Jaroszewski M.**, Ziaja J., Wilczyński W.: *Electromagnetic shielding of lightweight and flexible composites*. W: EM shielding - theory and development of new materials / [eds.] Maciej Jaroszewski, Jan Ziaja, Janina Pospieszna. Kerala : Research Signpost, 2012.  
<http://www.researchsignpost.com/UserBookDetail.aspx?bkid=1284&catid=268#>

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w opracowaniu koncepcji badań dotyczących wpływu szybkości nakładania warstw i ich składu na otrzymane właściwości elektryczne i ekranujące wytworzonego kompozytu, współudziale w zaplanowaniu doświadczeń, wykonaniu badań skuteczności ekranowania, analizie i interpretacji wyników badań skuteczności ekranowania, współudziale w napisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 25%.*

H10. Ziaja J., Szafran G., **Jaroszewski M.**: *Impact of technology on the shielding effectiveness of barrier materials damping frequency selected electromagnetic fields.* Progress in Electromagnetics Research Symposium PIERS 2013 Stockholm. ISSN 1559-9450

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji artykułu dotyczącego określenia możliwości uzyskania znaczącej wartości skuteczności ekranowania w przypadku nieciągłości metalicznych warstw nakładanych na powierzchnię włókniyny, współudziale w opracowaniu koncepcji badań, zaplanowaniu doświadczeń, współudziale w analizie i interpretacji wyników badań, napisaniu manuskryptu, opracowaniu redakcyjnym artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 50 %.*

H11. **Jaroszewski M.**: *Flexible barrier materials for protection against electromagnetic fields and their characterization.* European Physical Journal. B, Condensed Matter and Complex Systems. 2015, vol. 88, nr 262. IF - 01.223, MNiSW: 25 pkt., cytowania: 2

*Mój udział procentowy wynosi 100%.*

## c) Omówienie wskazanego osiągnięcia naukowo-badawczego

### Spis treści

<b>C1. WPROWADZENIE</b> .....	6
<b>C2. CIENKOWARSTWOWE POKRYCIA WŁÓKNINY POLIPROPYLENOWEJ</b> .....	8
<b>C3. SKUTECZNOŚĆ EKROWANIA POŁA ELEKTROMAGNETYCZNEGO WYTWORZONYCH KOMPOZYTÓW</b> .....	10
<b>C 4. WŁAŚCIWOŚCI DIELEKTRYCZNE WYTWORZONYCH KOMPOZYTÓW</b> .....	12
<b>C 5. NAJWAŻNIEJSZE OSIĄGNIĘCIA BADAWCZE</b> .....	16
<b>C 6. INFORMACJA O ZREALIZOWANYM PROJEKCIE BADAWCZYM I UDZIALE W NIM AUTORA</b> .....	17
<b>C 7. INFORMACJA O ZASTOSOWANIU APLIKACYJNYM WYTWORZONYCH KOMPOZYTÓW</b> .....	18

### C1. WPROWADZENIE

Obecnie jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin aplikacji materiałów kompozytowych jest inżynieria materiałów wykorzystywanych do ekranowania pól elektromagnetycznych [1-4, H1]. W wielu dziedzinach techniki zauważalne jest rosnące zainteresowanie stosowaniem do tego celu materiałów tekstylnych z celowo zmodyfikowanymi właściwościami powierzchniowymi [H1,5]. Ze względu na bardzo dobre właściwości mechaniczne i odporność na oddziaływania środowiskowe, wyjątkowego znaczenia nabierają produkty tekstylne na bazie polimerów. Kompozyty polimerowe w postaci materiału tekstylnego z cienką warstwą nanoszoną metodą plazmową mogą być używane jako bariery do ochrony osób i urządzeń elektronicznych, energoelektronicznych i elektrycznych wobec niekorzystnego oddziaływania pola elektromagnetycznego (EM) [6, 7].

Materiały stosowane w technice do ekranowania pól EM muszą charakteryzować się dostatecznie wysoką wartością współczynnika skuteczności ekranowania ( $SE$ ), definiowanego jako:

$$SE = 10 \cdot \log\left(\frac{|P_0|}{|P_t|}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{|E_0|}{|E_t|}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{|H_0|}{|H_t|}\right) \quad (1)$$

gdzie:  $P_0, P_t$  – moc fali elektromagnetycznej- odpowiednio padającej na ekran i przechodzącej przez ekran,  $E_0, E_t$  – składowa elektryczna fali elektromagnetycznej - odpowiednio padającej na ekran i przechodzącej przez ekran,  $H_0, H_t$  – składowa magnetyczna fali elektromagnetycznej - odpowiednio padającej na ekran i przechodzącej przez ekran.

Biorąc pod uwagę przypadek jednorodnego płaskiego ekranu, całkowita skuteczność ekranowania jest sumą skuteczności ekranowania od zjawisk: odbicia ( $r$ ), absorpcji ( $a$ ) oraz wielokrotnego odbicia i transmisji ( $t_{mr}$ ):

$$SE = SE_r + SE_a + SE_{t_{mr}} \quad (2)$$

Zdolność materiałów kompozytowych do ekranowania pola elektromagnetycznego jest nierozdzielnie związana z ich parametrami dielektrycznymi [8-10]:

$$SE = 20 \cdot \log\left(\frac{Z_0}{4Z_s}\right) + 20 \cdot \log(e^{d/\delta}) + 20 \cdot \log\left|1 - e^{-2d/\delta}\right| \quad (3)$$

gdzie:  $Z_0$ ,  $Z_s$  – impedancja falowa ośrodka i ekranu,

$\sigma$  - przewodność elektryczna,

$d$  – grubość ekranu.

W przypadku ekranu wykonanego z materiału o wysokiej przewodności elektrycznej  $\sigma$  i o grubości  $d$  znacznie większej niż głębokość wnikania  $\delta$ , dla którego spełniona jest zależność

$$d \gg \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (4)$$

tłumienie ekranu zależy praktycznie wyłącznie od strat odbicia i absorpcji. Wtedy równanie (2) można zapisać jako:

$$SE = SE_r + SE_a = \left(39.5 + 10 \cdot \log\left(\frac{\sigma}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu}\right)\right) + 8.7 \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} \quad (5)$$

gdzie:  $\sigma$  – przewodność elektryczna,  $\mu$  - przenikalność magnetyczna,  $f$  - częstotliwość fali elektromagnetycznej.

Dla uzyskania największych wartości skuteczności ekranowania, wykorzystuje się zarówno zjawisko odbicia jak i zjawisko absorpcji. Jednak głównym celem Autora było uzyskanie ekranów odbijające fale elektromagnetyczne o częstotliwościach do około 2 GHz. Cel ten wynikał z zadań Indywidualnego Projektu Kluczowego (dofinansowywanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007 – 2013 Priorytet I – Badania i rozwój nowoczesnych technologii Działanie 1.3 Wsparcie projektów B+R na rzecz przedsiębiorców, realizowanych przez jednostki naukowe Poddziałanie 1.3.1 Projekty rozwojowe) pt. „*Barierowe materiały nowej generacji chroniące człowieka przed szkodliwym działaniem środowiska*”, którego Autor był wykonawcą.

Jak wynika z równania (5) powierzchnia odbijająca skutecznie falę EM musi być elektrycznie przewodząca. W przypadku ekranów wykonanych z metalowych folii, blach lub siatek ekranujących, nie stanowi poważnego problemu technicznego osiągnięcie dużej wartości współczynnika  $SE$  (powyżej 70 dB) dla składowej elektrycznej pola EM. Jednakże takie ekrany są drogie, ciężkie i niekiedy niemożliwe do zastosowania w konkretnym przypadku.

Tych wad nie mają materiały kompozytowe. Materiały kompozytowe, w przeciwieństwie do ekranów metalowych stałych, charakteryzują się dobrymi właściwościami mechanicznymi (niska waga,

wysoka elastyczność), odpornością na warunki środowiskowe (temperatura, promieniowanie UV, korozja), stabilnością i niezmiennością tych parametrów w czasie eksploatacji oraz niskimi kosztami produkcji.

Materiały kompozytowe do ekranowania elektromagnetycznego są wytwarzane, między innymi, jako wyroby tekstylne zawierające przewodzące przędze. W takich materiałach współczynnik ekranowania  $SE$  zależy od: rodzaju ścięgu, przeplotu i od upakowania nici przewodzących. Celem badań podjętych przez Autora w ramach wymienionego projektu badawczego było uzyskanie nowych materiałów do osłony przed promieniowaniem EM w postaci plazmowo powlekanych wyrobów tekstylnych. Stanowiłyby one alternatywę dla stosowanych do tej pory wyrobów tekstylnych zawierających przewodzące nici [H1].

## C2. CIENKOWARSTWOWE POKRYCIA WŁÓKNINY POLIPROPYLENOWEJ

Obecnie najczęściej stosowaną metodą otrzymywania różnego typu cienkich warstw jest metoda rozpylania magnetronowego. Metoda ta polega na bombardowaniu powierzchni elektrody z rozpylanym materiałem (targetu) wysokoenergetycznymi jonami gazów roboczych. Jony te wybijają atomy lub cząstki z powierzchni targetu. Wybite atomy są osadzone na powierzchni obrabianego materiału tekstylnego (podłoża). Tym sposobem mogą być osadzone warstwy metaliczne i dielektryczne, nawet z materiałów wysokotopliwych [H5, H7].

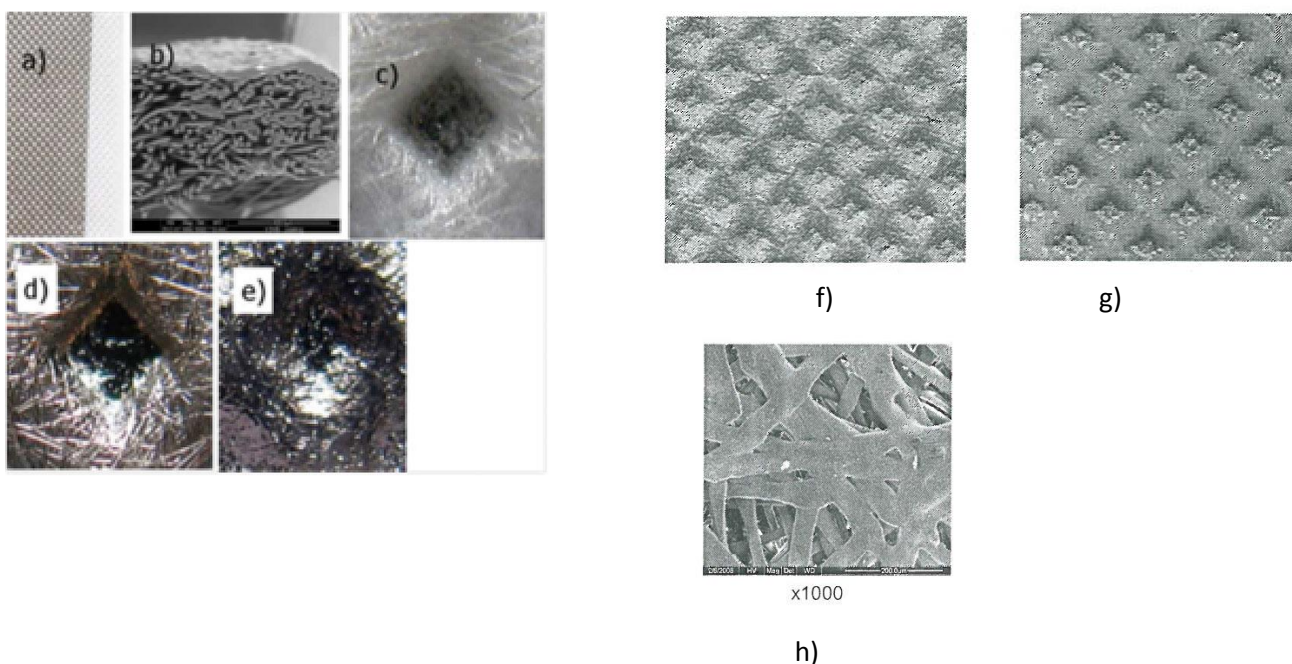
Urządzenia do rozpylania materiałów przy użyciu pola elektrycznego i magnetycznego nazywa się magnetronami lub działami plazmowymi. W wysokich polach elektrycznych i magnetycznych, jony gazów roboczych uzyskują dużą energię kinetyczną, a więc warstwy mogą być skutecznie nakładane z szybkością, która dla metali wynosi kilka mikrometrów / min, a dla warstw dielektrycznych jest rzędu 10-100 nm / min.

Tak wysokie szybkości osadzania warstw nie są dostępne w innych metodach. Ponadto podczas procesu rozpylania katodowego, plazma czyści i aktywuje powierzchnię podłoża. Dlatego też za pomocą metod magnetronowych można wykonać metalizację takich materiałów jak PTFE (politetrafluoroetylen) lub PP (polipropylen), co nie jest możliwe do wykonania innymi metodami, ze względu na właściwości powierzchniowe tych materiałów. Jako podłoża, Autor zdecydował się na użycie włókniny polipropylenowej. Decyzja ta wynikała z bardzo dobrych właściwości mechanicznych (niska gramatura, elastyczność, odporność na warunki środowiskowe) oraz dużej dostępności rynkowej i niskiej ceny. **Tego typu materiały ekranujące pole EM (włóknina polipropylenowa z naniesioną plazmowo warstwą przewodzącą) stanowią novum i nie są prezentowane w literaturze światowej.**



W celu wyznaczenia zależności skuteczności ekranowania i właściwości dielektrycznych kompozytowych ekranów elektromagnetycznych od rodzaju pokrycia i parametrów procesu plazmowego, wybrano pokrycia włókniny polipropylenowej węglem, różnymi metalami i warstwami tlenkowymi. Mikroskopowe badania morfologii powierzchni wykazały, że nakładane materiały tworzą stałą i ciągłą warstwę na powierzchni włókniny (rys. 1). Warto zauważyć, że warstwa pokrywa nie tylko powierzchnię włókniny, ale także włókna wewnętrzne (rys. 1b, 1h). Zwiększenie wartości mocy wydzielanej na elektrodzie powoduje nie tylko pokrycie punktów zgrzewania włókniny, ale także pokrywanie metalem wewnętrznych włókien wyrobu tekstylnego. Wynikiem tego jest zwiększenie efektywnej grubości metalicznej warstwy, co skutkuje zmniejszeniem rezystywności powierzchniowej kompozytu. Badania wykonane przez Autora [H3, H4] wykazały, że **o rezystywności powierzchniowej warstw nanoszonych w ustalonych warunkach procesu plazmowego na podłoża włókninowe decyduje znacząco struktura morfologiczna podłoża, zależna zarówno od rodzaju materiału wykorzystanego do produkcji włókniny, jak i jej gramatury**, z którą związany jest m.in. stopień rozbudowania powierzchni. Różne są w tym przypadku również właściwości relaksacyjne kompozytów otrzymanych na różnych podłożach, co uwidacznia się w przebiegach pojemności zespolonej [H3, H4].

Przewodnictwo elektryczne trójwymiarowej struktury porowatych kompozytów jest więc funkcją zarówno fizycznej struktury podłoża jak i naniesionej warstwy plazmowej, w których uwidacznia się wpływ zjawisk międzyfazowych na granicy włókno-warstwa plazmowa jak i dystrybucji warstwy plazmowej w objętości włókniny. Pomiar prądów przejściowych wykonane przez Autora [H8], wykazały istnienie ładunku związanego i zjawisk polaryzacyjnych. **Przewodnictwo elektryczne badanych kompozytów kontrolowane jest przez mechanizm Schottky'ego oraz hopping jonowy, a dla wyższych lokalnych natężeń pola elektrycznego także przez mechanizm Pole-Freenkel oraz SCLC (Space Charge Limited Current) [H8].**



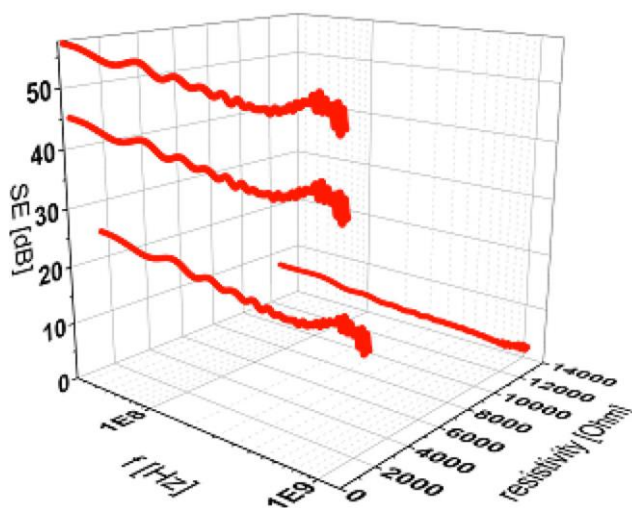
Rys. 1. Zdjęcia mikroskopowe morfologii powierzchni kompozytu (a) powierzchnia włókniny pokrytej warstwą metaliczną /kolor szary/ i bez pokrycia /kolor biały/, (b) przekrój poprzeczny kompozytu włóknina-warstwa metaliczna, (c) spawanie punktowe włókny, (d) punkt spawania włókniny pokryty warstwą metaliczną, (e) jak w (d) wraz ze wzrostem mocy emitowanej na elektrodzie rozpylanej [H11], (f) pokrycie węglowe powierzchni włókniny na stronie bardziej porowatej, (g) pokrycie węglowe powierzchni włókniny na stronie mniej porowatej, (h) warstwy węglowe na wewnętrznych włóknach [H1]

### C3. SKUTECZNOŚĆ EKRANOWANIA POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO WYTWORZONYCH KOMPOZYTÓW

Pomiary skuteczności ekranowania zostały zrealizowane w układzie pomiarowym wykonanym przez Autora zgodnie ze standardem ASTM D4935-99. Układ pomiarowy składał się z analizatora sieci – model E5061A ENA-L - i wytworzonego adaptera pomiarowego, który jest odcinkiem koncentrycznej linii powietrznej o impedancji charakterystycznej  $50 \Omega$ . Niepewność pomiaru wynosi około 2 dB. Częstotliwość odcięcia dla tej konstrukcji wynosi około 1.8 GHz. Skuteczność ekranowania obliczana jest jako różnica między transmitancjami lub między tłumieniami dla próbki referencyjnej i mierzonej. Próbka referencyjna ma postać okręgu o średnicy 33 mm umieszczonego współosiowo wewnątrz pierścienia o średnicach 133/76 mm. Próbka mierzona ma postać okręgu o średnicy 133 mm.

Na podstawie teorii falowej można wyjaśnić efekt tłumienia pola EM przez rozbieżności między impedancją falową ekranu a otaczającego środowiska [11]. Gdy powierzchnia ekranu ma właściwości przewodzące wówczas jego impedancja falowa ma stosunkowo niską wartość, nawet dla dużych

częstotliwości fali EM, w porównaniu do impedancji falowej charakteryzującej otoczenie. **Obniżenie wartości rezystywności powierzchniowej ekranu jest więc związane ze wzrostem współczynnika SE [H5, H9].** W przypadku włókien pokrytych warstwami przewodzącymi nie jest wymagane ciągłe połączenie metaliczne. Powstające mostki przewodzące (rys. 1h) całkowiec wystarczają do uzyskania wysokich wartości SE [11]. **Osadzanie cienkiej warstwy metodą plazmową na porowatej (szorstkiej) powierzchni włókniny może również zwiększyć aktywną powierzchnię ekranu, co silnie wpływa na skuteczność odbicia na warstwach międzyfazowych [H11].** Uzyskane wartości współczynnika SE są ściśle związane z rezystywnością powierzchniową wytworzonych warstw metalicznych, osiągając wartości do 60 dB (rys. 2). Badania wykonane przez Autora wykazały również, że brak połączeń metalicznych warstw przewodzących nie przeszkadza w uzyskaniu wartości współczynnika SE na poziomie 40 dB, w przypadku gdy warstwy metaliczne tworzą na powierzchni włókniny wzór o odpowiedniej geometrii (krzyż Jerozolimski) [H10].



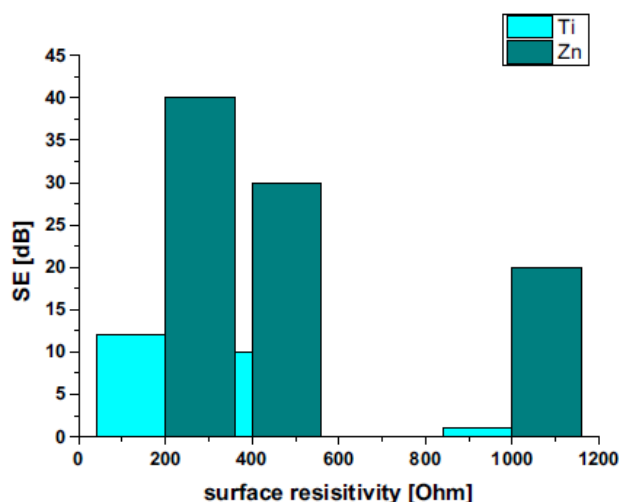
Rys. 2. Skuteczność ekranowania otrzymanych kompozytów włóknina-warstwa plazmowa jako funkcja częstotliwości i rezystywności powierzchniowej [H11]

Ekran elektromagnetyczne z włókniny pokrytej warstwą węglową charakteryzują się niską skutecznością ekranowania, nieprzekraczającą 10 dB. Jest to spowodowane wysoką rezystywnością powierzchniową warstw węglowych ze względu na ich strukturę diamentopodobną [H6].

Z teorii ekranowania pola elektromagnetycznego (EM) wynika, że do uzyskania ekranu elektromagnetycznego odbijającego fale EM, wystarczy, aby jego powierzchnia była przewodząca [12,13]. Wynikałoby z tego, że rezystywność powierzchniowa może być dobrym narzędziem do oceny właściwości ekranujących kompozytów włóknina-warstwa plazmowa. **Badania przeprowadzone przez Autora wykazały, że dla oceny właściwości ekranujących kompozytów złożonych z włókniny PP z plazmową warstwą przewodzącą rezystywność powierzchniowa nie jest jednak wystarczającym**

narzędziem dla oceny ich właściwości ekranujących, gdyż decydującą rolę odgrywa grubość i jednorodność warstwy [H5, H11].

W przypadku kompozytów PP/Zn i PP/Ti o zbliżonych wartościach rezystywności powierzchniowej  $\rho_s$ , stwierdzono różne wartości skuteczności ekranowania (rys. 3). W tym przypadku, warstwy cynkowe charakteryzują się wyraźnie większą grubością i jednorodnością niż warstwy Ti. Należy zatem stwierdzić, że jednorodność i ciągłość warstw Zn powoduje wzrost efektu odbicia fali elektromagnetycznej od tej powierzchni.



Rys. 3. Skuteczność ekranowania (SE) kompozytów z włókniyny pokrytych różnymi metalami, dla różnych rezystywności powierzchniowych [H11]

#### C 4. WŁAŚCIWOŚCI DIELEKTRYCZNE WYTWORZONYCH KOMPOZYTÓW

Jak wykazały badania Autora, skuteczność ekranowania kompozytów ekranujących polimer-metal nie jest determinowana tylko przez rezystywność powierzchniową warstwy przewodzącej. Również zjawiska fizyczne, występujące zarówno w każdej warstwie materiału kompozytowego jak i w ich międzyfazach, pełnią bardzo istotną rolę.

Kompozyty pracujące w zmiennych polach elektrycznych cechują się, oprócz przewodności, także obecnością zjawiska polaryzacji [H5]. Dla wykazania zależności pomiędzy właściwościami dielektrycznymi kompozytu składającego się z włókniyny polipropylenowej z osadzoną warstwą plazmową a jego strukturą, Autor zastosował metodę spektroskopii impedancyjnej (SI). Podstawą metody SI jest pomiar liniowej odpowiedzi elektrycznej badanego materiału na pobudzenie stosunkowo małym sinusoidalnym sygnałem napięciowym o postaci  $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ , w szerokim zakresie częstotliwości  $f$  ( $\omega = 2\pi f$ ). Odpowiedzią na sinusoidalny sygnał napięciowy jest sinusoidalny

sygnał prądowy  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$  o tej samej prędkości kątowej  $\omega$ . Prąd ten jest sumą prądu przewodzenia i prądu polaryzacji:

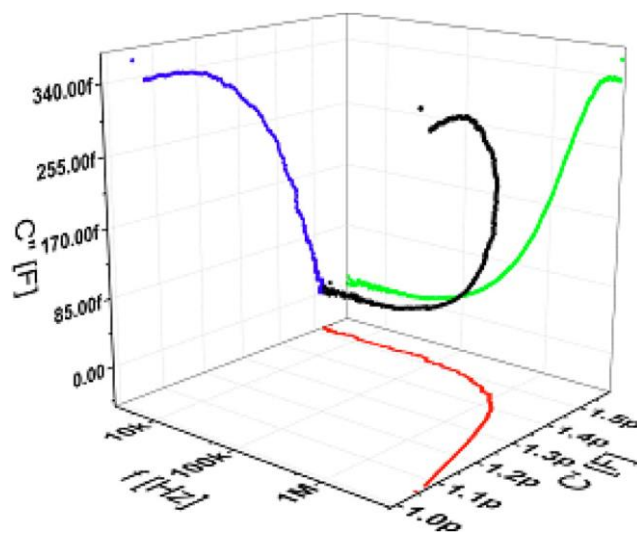
$$i(t) = \rho_0 \cdot E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} = \rho_0 \cdot E(t) + \frac{\varepsilon_0 \cdot \partial E(t)}{\partial t} + \frac{\partial P(t)}{\partial t} \quad (9)$$

Korzystając z transformacji Fouriera otrzymujemy wyrażenie na odpowiedź dielektryka w dziedzinie częstotliwości, dla której następnie obliczana jest transmitancja widmowa  $\underline{T}(\omega)$ . Transmitancja ta charakteryzuje zależność między wymuszeniem oraz odpowiedzią przesuniętą w fazie dla tej samej pulsacji  $\omega$ :

$$\underline{T}(\omega) = |\underline{T}(\omega)| \cdot e^{j\psi(\omega)} \quad (10)$$

gdzie:  $|\underline{T}(\omega)|$  jest to modułem, a  $\psi(\omega)$  jest argumentem transmitancji widmowej  $\underline{T}(\omega)$ . W spektroskopii impedancyjnej, transmitancja widmowa ma zazwyczaj postać impedancji zespolonej  $\underline{Z}(\omega)$  lub admitancji zespolonej  $\underline{Y}(\omega)$ . W metodzie spektroskopii impedancyjnej nie ograniczamy się jedynie do analizy częstotliwościowej impedancji lub admitancji badanego materiału (ich charakterystyk amplitudowych i fazowych lub zespolonych wartości transmitancji w funkcji częstotliwości), ale możemy również użyć innych wielkości, takich jak zespolona pojemność  $\underline{C}$  lub zespolona przenikalność  $\underline{\varepsilon}$ . Wielkości te są związane z zespoloną admitancją przez częstotliwość i parametry geometryczne próbki. Ich analiza częstotliwościowa pozwala wykazać i rozróżnić zjawiska, które występują jednocześnie w badanym materiale.

Do badań kompozytowych materiałów ekranujących metodą spektroskopii impedancyjnej Autor użył systemu pomiarowego składającego się z precyzyjnego analizatora impedancji Agilent 4294A oraz celki pomiarowej Agilent 16451B tworzącej trójelektrodowy kondensator pomiarowy. Analiza uzyskanych wyników wykonana została przez Autora na podstawie wielkości zespolonych przedstawionych w funkcji częstotliwości (wykres Body'ego) lub na płaszczyźnie zespolonej (wykres Cole-Cole), co przedstawiono łącznie na rysunku 4. Rysunek ten przedstawia właściwości dielektryczne kompozytu z włókniny pokrytej warstwą metaliczną, opisanym w tabeli 1. Analiza wyników sugeruje możliwość opisanie zjawisk polaryzacyjnych schematem zastępczym składającym się z równolegle połączonych idealnych elementów RC, jak również istnienie polaryzacji Maxwella-Wagnera. Można tu znaleźć analogie do właściwości dielektrycznych struktur laminarnych prezentowanych w [14].

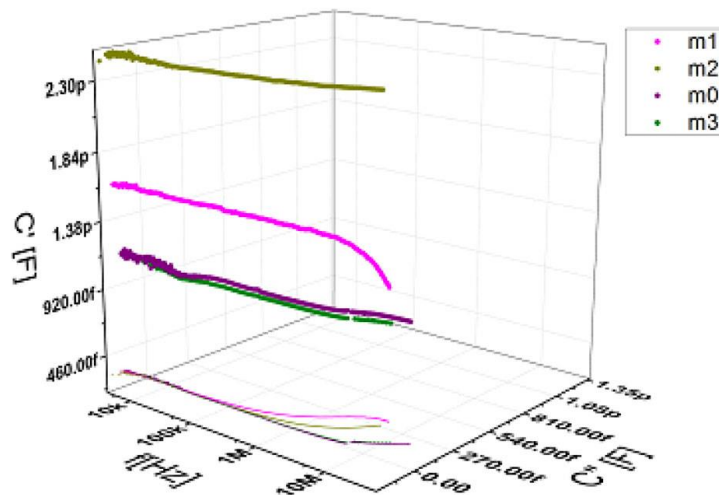


Rys. 4. Spektrum częstotliwościowe pojemności zespolonej kompozytu włóknina PP/Me [H11]

Dla ekranów wykonanych z włókniny z naprzemiennie ułożonymi warstwami Me i MeO (tab. 1), można zauważyć pewne ogólne prawidłowości [H5]. **Odpowiedź dielektryczna kompozytu jest ściśle uzależniona od tego, czy warstwa zewnętrzna utworzona jest przez warstwę metaliczną (próbki  $m_0$  i  $m_3$ ), czy też warstwa zewnętrzna utworzona jest przez tlenek metalu (próbki  $m_2$  i  $m_3$ ) (rys. 5).** Dla kompozytów z zewnętrzną warstwą metalu, w zakresie częstotliwości pomiarowych, możemy zaobserwować bardzo niewielkie różnice w częstotliwościowym spektrum mierzonych parametrów oraz w wykresach Cole-Cole, niezależnie od liczby warstw Me-MeO. Zupełnie inna sytuacja występuje dla kompozytów z warstwą zewnętrzną utworzoną przez tlenek metalu. W tym przypadku **możemy zaobserwować silną zależność właściwości dielektrycznych kompozytów od liczby tworzących je warstw Me-MeO [H5].**

Tabela 1. Opis próbek z naprzemiennie nałożonymi warstwami metalu (Me) i tlenku metalu (MeO)

	Me	MeO	Me	MeO	Me	MeO
$m_3$	•	•	•	•	•	
$m_2$		•	•	•		
$m_1$		•	•	•	•	•
$m_0$	•					



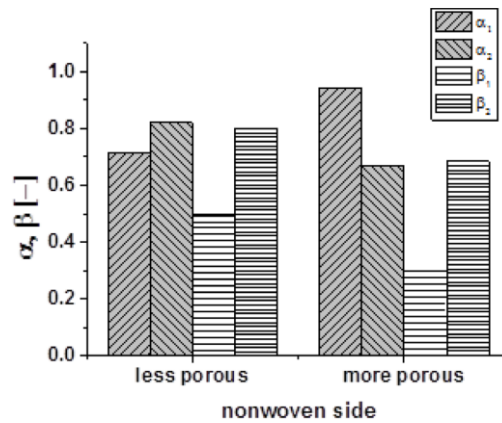
Rys. 5. Spektrum częstotliwościowe pojemności zespolonej kompozytów włókniny PP/Me-MeO [H11]

Metoda SI została także zastosowana przez Autora do ustalenia związku między strukturą powierzchni włókniny tworzącej podłoże a właściwościami dielektrycznymi otrzymanego kompozytu [H2]. Procesy relaksacyjne obserwowane w przypadku materiału z warstwami osadzonymi metodą plazmową na mniej porowatych podłożach wyróżniają się znacznie mniejszą amplitudą i są przemieszczane w kierunku niskich częstotliwości. W przypadku próbek z warstwami osadzonymi na bardziej szorstkiej stronie powierzchni włókniny, w tych samych warunkach procesu osadzania warstwy, piki relaksacyjne charakteryzują się znacznie większą amplitudą i są lekko przesunięte w kierunku wyższych częstotliwości. Te właściwości relaksacyjne zostały opisane przez funkcję relaksacyjną wprowadzoną przez Havriliaka i Negamiego:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{[1 + (i\omega\tau)^\alpha]^\beta} + \varepsilon_\infty = \frac{\Delta\varepsilon}{[1 + (i\omega\tau)^\alpha]^\beta} + \varepsilon_\infty, \quad (16)$$

gdzie:  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$ ,  $\varepsilon_0$  - przenikalność statyczna ( $\varepsilon_0 = \lim_{\omega \rightarrow 0} \varepsilon(\omega)$ ),  $\varepsilon_\infty$  jest wysokoczęstotliwościową granicą przenikalności ( $\varepsilon_\infty = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon(\omega)$ ),  $\alpha$  i  $\beta$  są parametrami opisującymi symetryczny i niesymetryczny rozkład czasów relaksacji,  $\tau$  jest charakterystycznym czasem relaksacji.

Wartości współczynników kształtu aproksymacji Havriliaka-Negamiego, pokazane na rysunku 6, wskazują, że spektra częstotliwościowe drugiego z obserwowanych procesów relaksacyjnych są bardziej symetryczne ( $\beta_2 \gg \beta_1$ ), lecz w obydwu przypadkach **widma relaksacyjne warstw osadzonych na bardziej porowatej stronie włókniny są bardziej symetryczne**. W przypadku tkaniny z warstwą osadzaną na bardziej porowatym podłożu szerszy rozkład stałych czasowych opisuje drugi z zaobserwowanych procesów relaksacyjnych (niższe wartości parametru  $\alpha_2$  niż w przypadku podłoża mniej porowatych). Poprzez zwiększenie wydajności procesu nakładania warstwy można zmniejszyć rezystywność powierzchniową modyfikowanej plazmowo włókniny. Można przypuszczać, że jest to skutkiem stopniowego eliminowania nieciągłości warstwy wytwarzanej w postaci mostków rezystancyjnych.



Rys. 6. Wartości współczynników kształtu aproksymacji Havriliaka-Negamię dla różnych struktur powierzchni włókniny z pokryciem cienkowarstwowym [H11]

Metodę tę Autor wykorzystał również do oceny korelacji między odpowiedzią dielektryczną kompozytu i jego rezystywnością powierzchniową [H3]. Zależność częstotliwościowa pojemności zespolonej kompozytów otrzymanych przy różnej intensywności procesu plazmowego, w zakresie częstotliwości badanej, wskazuje na obecność jednego procesu relaksacyjnego. **Zwiększenie intensywności procesu plazmowego prowadzi do obniżenia wysokoczęstotliwościowej składowej rzeczywistej pojemności zespolonej. W przypadku próbek, dla których stwierdzono gwałtowny wzrost przewodności powierzchniowej, której towarzyszy nagły spadek rezystywności skrośnej, obserwowane zmiany w odpowiedzi częstotliwościowej przy wysokich częstotliwościach (> 0,1 MHz) sugerują obecność drugiego zjawiska relaksacji.**

## C 5. NAJWAŻNIEJSZE OSIĄGNIĘCIA BADAWCZE

Do najważniejszych osiągnięć badawczych przedstawionych w cyklu publikacji H1 - H11 zaliczam:

- Współdziałanie w opracowanie procesu technologicznego wytwarzania innowacyjnych kompozytowych materiałów ekranujących pole elektromagnetyczne w postaci plazmowo powlekanych wyrobów tekstylnych,
- Opracowanie metod oceny tych materiałów,
- wykazanie, że przewodnictwo elektryczne trójwymiarowej struktury porowatych kompozytów jest funkcją zarówno fizycznej struktury podłoża jak i naniesionej warstwy plazmowej i jej dystrybucji w objętości włókniny,
- ustalenie związku między strukturą powierzchni włókniny tworzącej podłoże a właściwościami dielektrycznymi otrzymanego kompozytu,
- ustalenie korelacji między odpowiedzią dielektryczną kompozytu i jego rezystywnością powierzchniową,



- powiązanie odpowiedzi dielektrycznej kompozytów wielowarstwowych od rezystywności powierzchniowej warstwy zewnętrznej (materiał metaliczny lub tlenkowy),
- wykazanie, że o rezystywności powierzchniowej warstw nanoszonych w ustalonych warunkach procesu plazmowego na podłoża włókninowe decyduje znacząco struktura morfologiczna podłoża, zależna zarówno od rodzaju materiału wykorzystanego do produkcji włókniny, jak i jej gramatury,
- wykazanie, że na skuteczność ekranowania wpływa stopień porowatości powierzchni, na której osadzana jest warstwa,
- udowodnienie, że dla oceny właściwości ekranujących trójwymiarowych struktur kompozytów złożonych z włókniny PP z plazmową warstwą przewodzącą rezystywność powierzchniowa nie jest wystarczającym parametrem dla oceny ich właściwości ekranujących, gdyż bardzo wyraźną rolę odgrywa grubość i jednorodność warstwy.

#### C 6. INFORMACJA O ZREALIZOWANYM PROJEKCIE BADAWCZYM I UDZIALE W NIM AUTORA

Przedstawione osiągnięcie naukowe jest efektem zaangażowania Autora w realizację Indywidualnego Projektu Kluczowego, dofinansowywanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007 – 2013 Priorytet I – Badania i rozwój nowoczesnych technologii, Działanie 1.3 Wsparcie projektów B+R na rzecz przedsiębiorców, realizowanych przez jednostki naukowe, Poddziałanie 1.3.1 Projekty rozwojowe, pt. „*Barierowe materiały nowej generacji chroniące człowieka przed szkodliwym działaniem środowiska*”. Projekt ten realizowało konsorcjum badawcze w skład którego wchodziły:

- Instytut Włókiennictwa w Łodzi – Lider,
- Instytut Technologii Bezpieczeństwa „Moratex”,
- Politechnika Poznańska, Wydział Technologii Chemicznej, Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej,
- Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki,
- Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii,
- Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera,
- Centralny Instytut Ochrony Pracy –PIB.

Projekt podzielony był na pięć bloków tematycznych. Autor, w ramach Bloku I. *Materiały barierowe do ochrony przed polami elektromagnetycznymi (PEM)*, odpowiedzialny był za zadania:

- Temat 6. Opracowanie metodyki nanoszenia w plazmie magnetronowej warstw tłumiących PEM na nośniki włókiennicze.
  - 6.5 Badanie właściwości elektrycznych uzyskanych warstw.
- Zadanie 7. Badania nad plazmowym nanoszeniem na wyroby włókiennicze kompozytowych warstw barierowych wraz z oceną ich podstawowych parametrów strukturalnych.
  - 7.3 Spektroskopia dielektryczna uzyskanych półprzewodzących i dielektrycznych warstw.
  - 7.5 Ocena wpływu częstotliwości grupowej na parametry elektryczne warstw węglowych.
- Zadanie 8. Badanie nad nanoszeniem warstw tlenkowych i zabezpieczających.
  - 8.5 Spektroskopia dielektryczna uzyskanych półprzewodzących i dielektrycznych warstw.

**Rezultatem projektu, w ramach Bloku Tematycznego I, jest powstanie tkaniny barierowej chroniącej przed działaniem pól elektromagnetycznych i oferta technologiczna na jej wytwarzanie.**

Opis rezultatów znajduje się w publikacjach H1 - H11 oraz na stronie internetowej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, pod adresem <http://www.nauka.gov.pl/polska-nauka/innowacyjne-napylenie-magnetronowe-wloknin-ochronnych.html>

#### C 7. INFORMACJA O ZASTOSOWANIU APLIKACYJNYM WYTWORZONYCH KOMPOZYTÓW

Wyniki moich badań w znaczący sposób przyczyniły się do sukcesu projektu, którego rezultatem aplikacyjnym jest powstanie tkaniny barierowej chroniącej przed polem elektromagnetycznym wraz ze skierowaną do przedsiębiorców ofertą technologiczną na jej wytwarzanie. Moja działalność naukowa przyczyniła się także do powstania w Instytucie Włókiennictwa w Łodzi, unikatowego urządzenia do ciągłego nanoszenia cienkich warstw metalicznych na podłoża włókiennicze. Materiały barierowe wytworzone w tym urządzeniu, zgodnie z zaleceniami wynikającymi z wniosków z moich badań, zostały przetestowane w skali 1:1 na makiecie obiektu budowlanego. Wyniki tych badań, wskazujące na wysoką skuteczność ekranowania otrzymanych materiałów barierowych w warunkach polowych, przedstawione zostały podczas spotkania zespołu ENVIROTEX w Spale w styczniu 2012. Z informacji uzyskanych z Instytutu Włókiennictwa wynika, że w ramach działań pilotażowych materiały te instalowane w szpitalach, gdzie ekranuje się części badawcze obiektu od personelu i pacjentów.

## LITERATURA

1. F. Sarto, M.S. Sarto, M.C. Larciprete, C. Sibilina, Rev. Adv. Mater. Sci. 5, 329 (2003)
  2. M.S. Sarto, R. Li Voti, F. Sarto, M.C. Larciprete, IEEE Trans. EMC 47, 602 (2005)
  3. L.B. Wang, K.Y. See, J.W. Zhang, B. Salam, A.C.W. Lu, IEEE Trans. EMC 53, 700 (2011)
  4. J. Ziája, M. Ozimek, J. Janukiewicz, Przegląd Elektrotechniczny 86, 222 (2010)
  6. M.L. Gulrajania, D. Gupta, Indian J. Fibre Textile Res. 36, 388 (2011)
  7. K.H. Kale, A.N. Desai, Indian J. Fibre Textile Res. 36, 289 (2011)
  8. D. Depla, S. Segers, W. Leroy, T. Van Hove, M. Van Parys, Textile Res. J. 81, 1808 (2011)
  9. R. Perumalraj, B.S. Dasaradan, Indian J. Fibre Textile Res. 36, 35 (2011)
  10. M.H. Al-Saleh, U. Sundararaj, Carbon 47, 1738 (2009)
  11. R.B. Schulz, V.C. Plantz, D.R. Brush, IEEE Trans. ECM 30, 187 (1988)
  12. J. Pospieszna, The basics of the electromagnetic shielding, in EM Shielding – Theory and Development of New Materials, edited by **M. Jaroszewski**, J. Ziája (Kerala, Research Signpost, India, 2012)
  13. J. Pospieszna, 4, 205 (2006)
  14. K. Nitsch, Application of Impedance Spectroscopy in the Study of Electronic Materials (Wrocław University of Technology Press, 1999), in Polish
- H1 – H11 - symbolika oznaczeń publikacji odpowiada oznaczeniom wg pkt 4b)

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

### 5.1 Dorobek naukowy przed doktoratem

Studia magisterskie ukończyłem w 1993 roku. Pracę dyplomową na temat beziskiernikowych ograniczników przepięć wykonałem pod kierunkiem prof. dr hab. Inż. Zbigniewa Pohla. W tym czasie mój Promotor zaproponował mi kontynuację pracy naukowej w ramach studiów doktoranckich. Pracę doktorską pt. „Wpływ wybranych narażeń na warystory beziskiernikowych ograniczników przepięć wywołanych oddziaływaniem zabrudzeń na osłonę ochronnika” wykonałem także pod kierunkiem prof. Zbigniewa Pohla. Obroniłem ją w 1999 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej.

W okresie do uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych, mój dorobek naukowy stanowią: 1 publikacja, 5 referatów konferencyjnych, 3 prace niepublikowane. W tym okresie brałem udział w 4 pracach badawczych, w tym 2 zleceniach z przemysłu oraz 2 grantach badawczych finansowanych przez KBN (w tym, w jednym z nich, jako kierownik).

## **5.2 Dorobek naukowy po doktoracie**

Mój dorobek naukowy po doktoracie obejmuje 41 artykułów( w tym publikacje: 18 na Liście Filadelfijskiej, 15 z Impact Factor, 23 na Liście MNiSW, 1 na Web of Science CC, 6 Open Access), 28 referatów konferencyjnych, 1 komunikat konferencyjny, 3 rozdziały w książkach, 5 redaktorstw monografii i prac zbiorowych (1 redaktorstwo książki w trakcie edycji w Wydawnictwie), 31 sprawozdań z badań.

L.p.	Liczba prac	Liczba prac z IF	IF			Punkty MNiSW	Czasopismo	
			rok	IF	Liczba prac			
1	1		2018	4.553	1	35	<i>Arabian Journal of Chemistry</i>	
2	1	1	2009	0.1870	1	20	<i>Archives of Metallurgy and Materials.</i>	
3	1	1	2012	0.6280	1	25	<i>Composite Interfaces</i>	
4	2	0	-	-	-	6	<i>Energetyka</i>	
5	5	5	2016 2015	1.4360 1.2230	1 4	20	<i>European Physical Journal. B, Condensed Matter and Complex Systems</i>	
6	3	3	2017 2016 2010	2.1150 2.1150 1.4770	1 1 1	30 30 27	<i>IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation</i>	
7	1	1	2010	1.4920	1	32	<i>Journal of Non-Crystalline Solids</i>	
8	1	1	2016	2.8410	1	45	<i>Journal of the American Ceramic Society</i>	
9	1	0	-	-	-	9	<i>Pomiary, Automatyka, Kontrola</i>	
10	26	3	2016 2012 2010 2008 2007 2006 2005 2004 2003 2002 2001 2000	- - 0.2420 - - - - - - - - -	3	14 15 13 9 - - - - - - - -	<i>Przegląd Elektrotechniczny</i>	
SUMARYCZNIE				22.462		436		
CYTOWANIA							40	

### **5.2.1 Wysokonapięciowe ograniczniki przepięć i warystory ZnO**

Po doktoracie, kontynuowałem początkowo zainteresowania badawcze na problematyce wysokonapięciowych ograniczników przepięć i warystorów ZnO. Mój dorobek w tym zakresie pozwolił mi na uzyskanie z Komitetu Badań Naukowych grantu badawczego 4T10B 037 22 "Procesy degradacji

i metody diagnozowania wysokonapięciowych ograniczników przepięć z warystorami z tlenków metali dla sieci elektroenergetycznych", którego byłem kierownikiem w latach 2002-2004.

Prace, które prowadziłem, koncentrowały się głównie na badaniach zmian starzeniowych warystorów ZnO wysokonapięciowych ograniczników przepięć pod wpływem narażeń eksploatacyjnych i poszukiwaniu czułych wskaźników do wykrywania tych zmian. Miały one na celu lepsze niż dotychczas poznanie mechanizmu degradacji warystorów tlenkowych pod wpływem narażeń charakterystycznych dla pracy ograniczników przepięć w liniach napowietrznych i dobór odpowiednich metod oceny właściwości warystorów. Głównymi czynnikami narażeń eksploatacyjnych są, jak wynika m.in. z wcześniejszych prac Autora, narażenia wywołane nierównomiernym rozkładem potencjału na osłonie izolacyjnej ogranicznika przepięć prowadzące do zapłonu wewnętrznych wyładowań niezupełnych oraz narażenia związane z oddziaływaniem przepięć [II.A.10, II.E.8, II.E.15, II.E.19, II.L.21]\*.

W powstawaniu nieliniowego przewodnictwa warystorowej ceramiki ZnO decydującą rolę odgrywają bariery potencjału na granicach ziaren ZnO, związane z energetycznym i przestrzennym rozkładem stanów pułpkowych na powierzchni międzyfazowej. Zmiany degradacyjne dotyczą silnie aktywowanego termicznie obszaru niskoprądowego, gdzie właściwości warystora determinowane są przez bariery potencjału. Degradacja jest więc wynikiem procesów naruszających równowagę pomiędzy poziomami donorowymi ZnO i akceptorowymi stanami powierzchniowymi lub pułpkowymi na powierzchni międzyfazowej, prowadzącą do ruchu jonów i deformacji barier potencjału. Stąd też, początkowo, jako podstawowe kryterium oceny zmian starzeniowych Autor przyjął zmiany w prądzie przewodzenia warystorów. Za mające znaczenie diagnostyczne przyjęty został prąd przewodzenia warystorów mierzony w zakresie aktywowanego termicznie obszaru niskoprądowego, czyli z reguły do wartości napięcia trwałej pracy. To kryterium oceny zmian starzeniowych użyte zostało przez Autora do oceny stanu warystorów i kompletnych ograniczników poddanych narażeniom związanym z oddziaływaniem promieniowego pola elektrycznego o znaczących wartościach, wywołanych oddziaływaniem zabrudzeń na osłonach ograniczników przepięć i związanych z tym nierównomiernymi i dynamicznymi rozkładami potencjałów. Badania przeprowadzone zostały zarówno na kompletnych wysokonapięciowych ogranicznikach przepięć jak i na pojedynczych warystorach stosowanych w tych ogranicznikach. Badania diagnostyczne wykonywane były przy napięciu stałym i przemiennym. W tym drugim przypadku wykorzystany został wykonany przez Autora mikroprocesorowy układ wydzielający składową rezystancyjną z całkowitego prądu przewodzenia i układ wielokanałowej rejestracji [II.L.28, II.L.29]. Ponadto, pomiary prądów wykonywane były także za pomocą miernika do diagnostyki ograniczników przepięć w miejscu zainstalowania, proponowanego przez producenta ograniczników. Odporność warystorów ZnO na starzenie jonizacyjne pod wpływem nierównomiernego rozkładu

\* symbolika oznaczeń według Załącznika „Wykaz dorobku habilitacyjnego – nauki techniczne”

napięcia wzdłuż osłony ogranicznika badana była na kompletnych ogranicznikach wysokiego napięcia, w oparciu o zjawisko pojawiania i utrzymywania się na nich stabilnych stref suchych (K Chrzan, W Koehler, K Feser - Symposium on High Voltage Engineering, Graz, 1995). Badania Autora koncentrowały się na możliwości wykorzystania i rozwinięciu tej metody. Szereg prób przeprowadzonych przez Autora na ogranicznikach wysokiego napięcia i na modelach ogranicznika doprowadziły do przedstawienia nowej, powtarzalnej i nieskomplikowanej metody prób przyspieszonego starzenia. Metoda ta polega na częściowym zanurzeniu ogranicznika w wodzie, co doprowadza do pojawienia się wyładowań niezupełnych wewnątrz ogranicznika przy napięciu trwałej pracy, podobnie jak ma to miejsce w eksploatacji w przypadku oddziaływania zjawisk związanych z wyładowaniami zabrudzeniowymi. Wykorzystując opisaną wyżej metodę, Autor przeprowadził szereg różnorodnych cykli starzeniowych na ogranicznikach wysokiego napięcia. Wyniki tych badań wraz z uzupełniającymi je badaniami starzeniowymi pojedynczych warystorów w układach modelowych, pozwoliły na stwierdzenie, że [II.E.18, II.E.23, II.E.24, II.L.4, II.L.14, II.L.14, II.L.15, II.L.18, II.L.19, II.L.22, II.L.27].:

- Metoda umożliwia odwzorowanie rzeczywistych narażeń i związanych z nimi zmian degradacyjnych warystorów,
- Oddziaływanie wewnętrznych wyładowań niezupełnych może być krytycznym narażeniem prowadzącym do nieodwracalnych zmian degradacyjnych zarówno materiału warystorowego jak i materiału osłon powierzchni bocznych warystorów,
- Zjawisko silnej degradacji właściwości warystorów kompletnego ogranicznika wysokiego napięcia objawia się wzrostem wartości prądu przewodzenia mierzonego przy napięciu stałym, wzrostem wartości składowej rezystancyjnej prądu przewodzenia mierzonego przy napięciu przemiennym o częstotliwości sieciowej jak i wzroście zawartości wyższych harmonicznych w sygnale prądowym.
- Stwierdzono również, że narażenia wyładowaniami niezupełnymi mogą powodować zmiany w mikrostrukturze ceramiki ZnO, związane z transportem ładunku i skutkujące zmianą pojemności całego warystora. Zmiany te przejawiają się w zwiększeniu składowej pojemnościowej prądu przewodzenia warystora ZnO oraz zmianach jego pojemności elektrycznej,
- Zjawisko degradacji właściwości warystorów stosu zmiennooporowego ogranicznika jest silnie zależne od położenia warystora w kolumnie.
- W układach modelowych większe zmiany degradacyjne zachodzą dla warystorów starzonych wyładowaniami niezupełnymi poddanych oddziaływaniu napięcia sieciowego o wartości odpowiadającej napięciu trwałej pracy

W toku laboratoryjnych badań modelowych Autor wykazał, że zjawiska powodujące powstawanie silnych gradientów radialnych pola elektrycznego mogą występować nie tylko w ogranicznikach w osłonach porcelanowych, ale także w ogranicznikach w osłonach kompozytowych. W warunkach eksploatacyjnych jest to dość prawdopodobne, zwłaszcza podczas narażeń wywołanych nie tylko silnymi zanieczyszczeniami, ale i długotrwałymi opadami. Obserwuje się wówczas przejściowe osłabienie właściwości hydrofobowych powierzchni osłon ograniczników. Skutkiem jest wzrost prądu upływu i erozja materiału osłonowego oraz tendencja do przejściowo nierównomiernego rozkładu napięcia wzdłuż osłony [II.L.18].

Mając na celu ocenę zmian degradacyjnych w ceramice warystorowej poddanej oddziaływaniu narażeń udarowych - wynikających z ruchu ładunku elektrycznego w mikrostrukturze materiału, którą tworzy połączenie półprzewodnikowych ziaren i nieprzewodzącej fazy międzyziarnej oddzielonych powierzchniami międzyfazowymi i zachodzących w nim zjawisk polaryzacyjnych - stosowany przeze mnie aparat badawczy rozszerzyłem w tym czasie o metodę spektroskopii dielektrycznej. W tym celu Autor zaplanował program badań, w którym warystory stosowane w produkcji wysokonapięciowych ograniczników przepięć poddane zostały próbie odporności na udary prądowe długotrwałe, próbie działania prądem wyładowczym długotrwałym, próbie odporności na przepięcia dorywcze [II.E.3, II.E.5, II.E.7, II.E.22, II.L.17]. Następnie sprawdzane było, czy w tworzywie ujawniły się zmiany degradacyjne analizując przebiegi średniej mocy wydzielanej przez warystory, przebiegi częstotliwościowe współczynnika strat dielektrycznych (metoda spektroskopii dielektrycznej) oraz pomiary prądów termo-stymulowanych. Jakkolwiek analiza przebiegów średniej mocy wydzielanej w warystorach nie wykazała istotnych zmian degradacyjnych, to pomiary wykonane metodą spektroskopii dielektrycznej wykazały zapoczątkowanie procesów degradacyjnych w postaci wzrostu współczynnika strat dielektrycznych w całym zakresie częstotliwości pomiarowej. W wyniku degradacji zmienia się również nachylenie przebiegów w zakresie wyższych częstotliwości, co ogólnie daje efekt spłaszczenia badanych przebiegów relaksacyjnych. Może to sugerować, że quasi-statyczne procesy obecne w zakresie niskich częstotliwości, które mogą być spowodowane zjawiskami międzyfazowymi, stają się bardziej znaczące w porównaniu ze zjawiskami zachodzącymi w objętości materiału, dającymi efekty quasi-statyczne w zakresie średnich częstotliwości. Procesy przewodności, uwidocznione w przebiegach współczynnika strat dielektrycznych warystorów przed i po starzeniu, są silnie aktywowane termicznie. Wykonane badania TSC potwierdziły, że wzrostowi wartości prądu przewodzenia w wyniku oddziaływań degradacyjnych towarzyszy zmniejszenie energii aktywacji procesu przewodnictwa, co oznacza zmniejszenie bariery potencjałów.

Oprócz badań laboratoryjnych, do analizy zachowania się warystorów ZnO w eksploatacji zastosowałem także symulacje komputerowe [II.E.6, II.E.12, II.E.14, II.L.6, II.L.11, II.L.12, II.L.13, II.L.16,

II.L.20]. W tym celu przedstawiłem model fizyczny warystora, odwzorowujący jego mikrostrukturę. Na tej podstawie powstał matematyczny model analityczny opisany przy użyciu metody superpozycji. Obliczenia wykonywane były za pomocą opracowanego programu aplikacyjnego pracującego w środowisku MATLAB<sup>®</sup>. Model został następnie zweryfikowany na podstawie porównania rzeczywistych przebiegów chwilowych prądu warystora ZnO z przebiegami uzyskanymi z modelu. Na podstawie zweryfikowanego modelu, wykonane zostały badania wpływu parametrów modelu warystora na jego odpowiedź prądową, pozwalające na interpretację zmian w strukturze warystora wywołanych oddziaływaniem różnego rodzaju narażeń. Za pomocą modelu zweryfikowano wpływ zawartości harmonicznych w napięciu zasilającym na wyniki diagnostyki ograniczników przepięć. Udowodniono bardzo silny wpływ zawartości harmonicznych w napięciu pracy ogranicznika na wartość trzeciej harmonicznej prądu, wykorzystywanej do wyznaczenia przez przyrządy diagnostyczne składowej rezystancyjnej prądu przewodzenia stosu warystorowego. Jak wynika z wyników symulacji, wzrost zawartości harmonicznych w napięciu zasilającym jest równoznaczny ze wzrostem wartości trzeciej harmonicznej prądu przewodzenia warystora. Bardzo istotnym aspektem poznawczym i aplikacyjnym wynikającym z tego faktu jest to, że wyniki badań diagnostycznych wskazujące na znaczący wzrost składowej rezystancyjnej (wyznaczonej z trzeciej harmonicznej) nie muszą oznaczać zmian degradacyjnych w warystorach ZnO.

Tę tematykę rozszerzyłem o zagadnienia związane z technologią otrzymywania cienkowarstwowych warystorów ZnO otrzymywanych metodą magnetronową, z ich właściwościami elektrycznymi i właściwościami czujnikowymi [II.E.16, II.E.17, II.E.20, II.E.21, II.L.8, II.L.26]. Motywacją do podjęcia tej tematyki było uzyskanie warystorów o znacząco mniejszych wartościach napięcia zadziałania niż możliwych do uzyskania w warystorach otrzymywanych technologią ceramiczną. Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na stwierdzenie, że:

- Uzyskanie efektu warystorowego cienkich warstw ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wymaga wygrzewania w temperaturach już od około 700 °C, to jest w znacząco niższych temperaturach niż w przypadku technologii ceramicznej,
- Zwiększenie temperatury wygrzewania, podobnie jak grubości warstwy, powoduje zwiększenie wartości napięcia zadziałania oraz powoduje wzrost współczynnika nieliniowości.
- Napięcie zadziałania warystorów cienkowarstwowych zależy od rodzaju i koncentracji gazu, w którym pracuje warystor. Możliwe jest więc wykorzystanie warystorów cienkowarstwowych jako czujników gazu i zabezpieczeń progowych dla urządzeń pracujących w atmosferze gazów palnych. Ich czułość można zwiększyć podnosząc temperaturę pracy warystora.



### **5.2.2 Wysokonapięciowa izolacja napowietrzna. Procesy starzeniowe elektroporcelany.**

Równolegle zajmowałem się także problematyką wysokonapięciowej izolacji napowietrznej. Oprócz zagadnień związanych z wpływem zabrudzeń i dobozem odstępów izolacyjnych zajmowałem się kompleksowymi badaniami izolatorów napowietrznych wysokiego napięcia po długoletniej eksploatacji [II.A.3, II.A.11, II.A.12, II.E.10, II.E.11, II.E13, II.L.9, II.L.10]. Poszerzyły one wiedzę dotyczącą efektów degradacji starzeniowej elektroporcelany. Wykazano, że istotą degradacji starzeniowej jest stopniowe rozszerzanie się już istniejących mikropęknięć i powstawanie nowych pod wpływem naprężeń: mechanicznych, strukturalnych i termicznych - występujących w strukturze materiału. Naprężenia te można podzielić na dwa zasadnicze typy: rezydualne oraz wywołane czynnikami zewnętrznymi. Naprężenia rezydualne (resztkowe, wewnętrzne) powstają podczas produkcyjnych procesów technologicznych, formowania i odpowietrzania, a szczególnie w ostatnim etapie wypalania - chłodzenia. Efektem tego jest powstanie znaczących naprężeń mechanicznych: w mikroskali - na granicach ziaren kwarcu i szklistej matrycy, w skali półmikro wynikających z anizotropii tekstury, a także naprężeń na makroskali pomiędzy wewnętrznym i zewnętrznym obszarem pnia izolatora - wywołanych przez gradient temperatury podczas chłodzenia. Tylko naprężenia ściskające na granicy korpusu ceramicznego i szkliva są zamierzone i zwiększają wytrzymałość obiektu. W eksploatacji, izolatory są narażone na znaczne naprężenia statyczne, zmienne cykliczne, a także szczególnie niebezpieczne, obciążenia dynamiczne wynikające z drgań przewodnika. Naprężenia te, oddziałując wspólnie z rezydualnymi, przyspieszają procesy starzenia.

W badaniach napowietrznych izolatorów długopniowych użyta została nowa nieinwazyjna metoda ultradźwiękowa. Polega ona na pomiarze kształtu, amplitudy i prędkości fali ultradźwiękowej o częstotliwości 4.7 GHz przemieszczającej się w poprzek pnia izolatora. Na podstawie zmierzonej prędkości propagacji fali w ceramice i jej gęstości możliwe jest wyznaczenie modułu Younga oraz współczynnika Poissona. Do oceny mikrostruktury ceramiki wykorzystano zależność jej właściwości elektrycznych i mechanicznych od porowatości oraz znaną liniową zależność modułu Younga od prędkości propagacji fali ultradźwiękowej. Z kolei istnienie strukturalnych niejednorodności objawia się zmianą amplitudy i kształtu fali ultradźwiękowej. Badania wykonywano w miejscu eksploatacji – na stacjach transformatorowo-rozdzielczych energetyki przemysłowej, oraz w warunkach laboratoryjnych – zarówno na izolatorach WN jak i na wyciętych z nich próbkach.

Materiały porcelanowe poddano badaniom mechanoakustycznym, ultradźwiękowym i mikroskopowym. W rezultacie wyróżniono kolejne etapy degradacji strukturalnej. Badania pokazują, że istnieje podobieństwo między długotrwałym działaniem pod obciążeniem roboczym a degradacją materiału podczas stosunkowo krótkiego testu ściskania, pod warunkiem, że przyrost obciążenia jest

powolny (quasi-statyczny). Wyniki pomiarów mechaniczno-akustycznych różnych materiałów ceramicznych, uzyskane do tej pory, pozwalają wyróżnić trzy etapy degradacji struktury:

- Pierwszy (wstępny) etap pokazuje niskie lub umiarkowane natężenie sygnałów AE. Etap wstępny związany jest z rozwojem wad powstałych podczas operacji technologicznych.
- Etap podkrytyczny pokazuje niską lub umiarkowaną intensywność aktywności AE. Zakres naprężeń i deskryptorów sygnałów AE jest charakterystyczny dla poszczególnych próbek i zwykle znacznie różnią się one między sobą. Etap podkrytyczny związany jest z niejednorodnością struktury próbki w skali mikro i pół-makro.
- Końcowy (krytyczny) etap jest najkrótszy i w dużej mierze zależy od wytrzymałości mechanicznej próbki. Krytyczny etap bezpośrednio poprzedza dekohezję próbek. Jest stosunkowo wąski i zawiera wysoką energię AE. Po propagacji długich krytycznych pęknięć następuje bardzo silna i ciągła aktywność AE. Najczęściej pękanie i odrywanie większych kawałków (ścian i narożników) od próbki poprzedza jej uszkodzenie.

Możliwe jest więc porównanie właściwości mechanicznych i akustycznych oraz odporności na degradację różnych materiałów ceramicznych. Na podstawie przeprowadzonych badań dotyczących porcelany elektrotechnicznej wykazano, że istnieje podobieństwo między długotrwałym działaniem pod obciążeniem roboczym a degradacją materiału podczas stosunkowo krótkich badań laboratoryjnych.

Metoda ta została już z powodzeniem zastosowana w diagnostyce izolatorów ceramicznych wysokiego napięcia w podstacjach zasilających duże zakłady przemysłowe.

### **5.2.3 Mechanizmy przewodzenia prądu w ceramice ferrytowej**

W ramach współpracy międzynarodowej nawiązanej z prof. Charanjeet Singh z Department of Electronics and Communication Engineering, Rayat Bahra Institute of Engineering and Nanotechnology, Hoshiarpur, Punjab, India, zajmowałem się tematyką związaną z mechanizmami przewodzenia prądów w ceramice ferrytowej [II.A.4, II.A.5, II.A.6, II.A.7, II.A.8, II.A.9]. Badanymi przeze mnie materiałami były heksagonalne ferryty typu M, które są szczególną klasą ferrytów wykorzystywanych, jako absorbery mikrofal ze względu na straty dielektryczne i magnetyczne, rezonans ściany domenowej i rezonans ferromagnetyczny (FMR) związany z relaksacją spinu w sygnale mikrofalowym.

Przewodnictwo elektryczne w ferrytach wynika przede wszystkim z hoppingu elektronów między jonami  $Fe^{3+}$  i  $Fe^{2+}$ . Dotowanie materiału jonami innych pierwiastków ( $Co^{2+}$ ,  $Ru^{4+}$ ,  $Ti^{4+}$ ,  $Mn^{2+}$ ) powoduje

zmiany koncentracji jonów  $\text{Fe}^{3+}$  co wpływa na hopping pomiędzy jonami  $\text{Fe}^{3+}$  i  $\text{Fe}^{2+}$  oraz na rozmiary ziaren, a więc i liczbę granic międzyziarnowych zmieniających opór na drodze przepływu prądu. Na przewodnictwo elektryczne duży wpływ ma wysoka temperatura spiekania ferrytów, prowadząca do utraty tlenu i powstania wakansji tlenowych. Klasycznym sposobem identyfikacji mechanizmu przewodzenia, zastosowanym przez Autora, jest badanie liniowości krzywych  $J(E)$  ( $I(U)$ ). Zależność gęstości prądu  $J$  od natężenia pola elektrycznego  $E$  spełnia uniwersalne prawo potęgowe w postaci  $J \sim E^m$ . W zależności od wartości wykładnika ( $m$ ); mechanizm przewodzenia zmienia się od omowego ( $m = 1$ ) do różnych typów nie-omowego ( $m > 1$ ):

- różne typy przewodnictwa ograniczonego ładunkiem przestrzennym (Space Charge Limited Conduction-SCLC),
- przewodnictwo Shottky'ego,
- przewodnictwo Poole-Frenkel,
- przewodnictwo Fowler-Nordheim,
- przewodnictwo hoppingowe.

Przebadane zostały materiały ferrytowe o różnym składzie chemicznym, dotowanych pierwiastkami o zmiennej koncentracji:

- $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_x\text{Ru}_x\text{Fe}_{(12-2x)}\text{O}_{19}$  dotowane  $\text{Co}^{2+}$  i  $\text{Ru}^{4+}$
- $\text{BaCo}_x\text{Ti}_x\text{Fe}_{(12-2x)}\text{O}_{19}$  dotowane  $\text{Co}^{2+}$  i  $\text{Ti}^{4+}$
- $\text{SrCo}_x\text{Ti}_x\text{Fe}_{(12-2x)}\text{O}_{19}$  dotowane  $\text{Co}^{2+}$  i  $\text{Ti}^{4+}$
- $\text{CaCo}_x\text{Ti}_x\text{Fe}_{(12-2x)}\text{O}_{19}$  dotowane  $\text{Co}^{2+}$  i  $\text{Ti}^{4+}$
- $\text{Sr}(\text{MnTi})_x\text{Fe}_{(12-2x)}\text{O}_{19}$  dotowane  $\text{Mn}^{2+}$  and  $\text{Ti}^{4+}$

#### **5.2.4 Biodegradowalne oleje transformatorowe na bazie estrów organicznych**

Główna tematyka badawcza, którą się obecnie zajmuję, jest ukierunkowana na poznanie wpływu różnych czynników na właściwości elektroizolacyjne transformatorowych olejów biodegradowalnych (estrów roślinnych), dające podstawę do przewidywania zachowania się tych nowych cieczy w warunkach eksploatacji izolacyjnych układów transformatorów. Prowadzone przeze mnie badania są ukierunkowane na zbadanie wpływu wody rozpuszczonej w oleju roślinnym na jego właściwości dielektryczne, wytrzymałość elektryczną, inicjację i rozwój wyładowań niezupełnych, elektryzację statyczną, zjawiska elektrokonwekcji [II.A.2, II.E.2, II.L.1, II.L.4].

Przesłanką wskazującą na celowość podjęcia tych badań jest duża maksymalna rozpuszczalność wody w oleju roślinnym w porównaniu do maksymalnej rozpuszczalności wody w oleju mineralnym. Może ona wpływać na właściwości dielektryczne (stratność, rezystywność), a zwłaszcza na wytrzymałość elektryczną. Polarność olejów roślinnych, przy obecności wilgoci, może niestety wzmocnić niekorzystne procesy fizyczne, występujące słabiej w niepolarnych olejach mineralnych. Dotychczasowe prace badawcze dotyczące tej problematyki na świecie mają jeszcze charakter rozpoznawczy i dotyczą fragmentarycznych zagadnień.

#### Wpływ przegrody na wytrzymałość biodegradowalnego oleju transformatorowego

Bariery izolacyjne stanowią nieodłączny element układu izolacyjnego transformatorów mocy. Celem badań Autora było określenie wpływu bariery, jej kształtu i położenia w przestrzeni międzyelektrodowej na wytrzymałość biodegradowalnego oleju transformatorowego. Zastosowanie przspanowej bariery w układzie elektroizolacyjnym z biodegradowalnym olejem transformatorowym znacząco podwyższa napięcie przebicia układu poddanego działaniu napięcia przemiennego.

Efektywność bariery zależy od jej pozycji w przerwie międzyelektrodowej oraz od jej wymiarów geometrycznych. W pracy ustalono, że optymalną pozycją bariery w układzie z biodegradowalnym olejem transformatorowym, jest pozycja tuż przy elektrodzie ostrzowej. Zwiększenie wymiarów bariery pozytywnie wpływa na zwiększenie wytrzymałości układu.

#### Zjawisko elektryzacji statycznej

Zjawisko elektryzacji statycznej występuje na powierzchni granicznej oddzielającej fazę stałą i ciekłą. Ze względu na wzajemne przemieszczanie tych faz, w sąsiedztwie warstwy oddzielającej generowany jest ładunek elektrostatyczny. Zjawisko to może prowadzić do wzrostu natężenia pola elektrycznego, a w konsekwencji do inicjacji wyładowań niezupełnych oraz możliwego trwałego uszkodzenia transformatora. Jest to szczególnie istotne dla transformatorów wypełnionych olejem biodegradowalnym. Moje badania wykazały większe wartości prądów elektryzacji oleju biodegradowalnego w porównaniu z olejem mineralnym. Podczas badań wpływu stopnia chropowatości powierzchni tarczy na elektryzację biodegradowalnego oleju transformatorowego, Autor zaobserwował podobne zależności, jak w przypadku olejów mineralnych. Zwiększenie chropowatości powierzchni tarcz powodowało wyższe wartości prądu w porównaniu z tarczami o bardziej gładkiej powierzchni.

### Wyładowania niezupełne.

Procesy prowadzące do powstawania wyładowań niezupełnych w cieczy izolującej są losowe, regulowane nie tylko przez parametry fizykochemiczne cieczy, ale także przez geometrię elektrod, procedurę pomiarową i zanieczyszczenia. Moje badania miały na celu określenie wpływu geometrii elektrod i metody pomiarowej (sposobu narostu napięcia) na napięcie inicjacji wyładowań niezupełnych (PDIV) w estrze organicznym w obecności wody rozpuszczonej. Moje badania wykazały, że dla układów elektrod ostrze – elektroda płaska i ostrze – elektroda kulowa, wpływ promienia czubka ostrza na pomiar PDIV ma istotne znaczenie dla układu elektrod z płaską uziemioną elektrodą. Z kolei, wpływ metody badawczej na pomiar PDIV jest szczególnie widoczny w przypadku suchego oleju. Wpływ wody rozpuszczonej wynika z kolei ze zmian w strukturze oleju zawilgoconego, a tym samym zmiany w warunkach jonizacji oleju i mobilności ładunku.

Naturalna ciecz estrowa jest syntetyzowana przez estryfikację cząsteczki glicerolu, która zasadniczo składa się z trójglicerydów i trzech cząsteczek długołańcuchowych kwasów tłuszczowych połączonych ze sobą wiązaniami estrowymi. Kwasy tłuszczowe składają się z liniowych łańcuchów węglowodorowych, które mogą być nasycone, zakończone funkcją karboksylową. Łańcuchy kwasów tłuszczowych odgrywają dominującą rolę w określaniu właściwości fizykochemicznych olejów transformacyjnych na bazie estrów naturalnych. Woda w naturalnym estrze może występować w postaci rozpuszczonej - woda występuje, jako pojedyncze cząsteczki w całej objętości oleju i tworzy jednorodną mieszaninę; i jako chemicznie związana - cząsteczki wody mogą być wychwytywane przez wiązania wodorowe z grupami karboksylowymi. W postaci rozpuszczonej woda może reagować z trójglicerydami tworząc długie łańcuchy kwasów tłuszczowych w reakcji hydrolizy estrowej. Zmienia strukturę cząsteczkową cieczy, co wpływa na ruchliwość nośników ładunku ze względu na lepkość płynu i zmianę ich liczby ze względu na warunki jonizacji cieczowej. Proces ten zmniejsza napięcie początkowe PD w wilgotnym oleju w porównaniu z suchym olejem.

### Elektrokonwekcja

Do wywołania elektrohydrodynamicznego ruchu cieczy izolacyjnej wymagane jest odpowiednio duże natężenie lokalnego pola elektrycznego. Uzyskanie odpowiedniej wartości pola elektrycznego warunkującej emisję ładunku do cieczy izolacyjnej jest zależne od geometrii układu elektrod, rodzaju cieczy izolacyjnej, materiału elektrod. W tej dziedzinie, moja praca koncentrowała się na określeniu wpływu geometrii elektrod, materiału elektrod i zawartości wody rozpuszczonej na napięcie inicjacji ruchu elektrohydrodynamicznego estru organicznego. Badania wykonane przeze mnie wykazały mniejsze wartości napięcia inicjacji EHD w niesymetrycznych układach elektrod, w szczególności z

elektrodą emisyjną o małym promieniu krzywizny. Wyniki te zgodne są z zależnościami napięcia inicjacji emisji ładunku z elektrody ostrzowej od geometrii układu elektrod. W małej krytycznie naprężanej objętości oleju dużo istotniejszy od rozkładu pola elektrycznego wynikającego z geometrii elektrod, może być rozkład pola wynikający z oddziaływania ładunku przestrzennego znajdującego się w pobliżu elektrody emisyjnej. Stąd też wynika obserwowane obniżenie progu napięcia inicjacji EHD w układzie pola jednorodnego dla małych odległości międzyelektrodowych. Wzrost wartości napięcia EHD można wiązać z mniejszym gradientem natężenia lokalnego pola oraz z tworzeniem nośników ładunku głównie w procesach typu redox.

Rozkład pola elektrycznego odgrywa również znaczącą rolę w procesie przekształcania się ruchu laminarnego wywołanego zjawiskiem elektrokonwekcji, w ruch turbulentny. Zaobserwowałem, iż w jednorodnym polu elektrycznym, ruch turbulentny występuje przy niższych napięciach.

Na napięcie progowe rozwoju zjawiska elektrokonwekcji silny wpływ ma również materiał z którego wykonane są elektrody. Najmniejsze napięcie inicjacji elektrokonwekcji zaobserwowano dla elektrod wykonanych z miedzi. Efekt ten, związany jest z mechanizmem iniekcji jonowej, który zależy od materiału, z którego wykonana jest elektroda wstrzykująca.

Wyniki moich badań wskazują, że wpływ zawartości wody na napięcie progowe elektrokonwekcji jest mniejszy w estrze naturalnym niż w oleju mineralnym. Jest to głównie związane z faktem, iż ester naturalny charakteryzuje się znacznie większą rozpuszczalnością wody niż olej mineralny. Ester naturalny będący cieczą polarną, charakteryzuje się znacznie większą rozpuszczalnością wody niż olej mineralny. Znacznie słabszy wpływ zawartości wody rozpuszczonej na wartość napięcia inicjacji EHD niż obserwowany w olejach mineralnych może wynikać z procesów solwatacji. Procesy elektrochemiczne na powierzchni elektrody będą uzależnione od rozmiarów powłoki solwatowanego jonu, zależnej od odległości solwatowanego jonu od powierzchni elektrody.

(Maciej Jaroszewski, Abderrahmane Beroual, Marek Dziedziul, *Electro-convection in natural ester based transformer oil*. – w trakcie recenzji w IEEE TDEI.)

### **5.3. Współpraca zagraniczna nawiązana w ramach działalności naukowej:**

- Prof. Sabu Thomas, Vice-Chancellor Mahtma Ghandi University, dyrektor Polymer Science and Engineering, School of Chemical Science, Mahatma Ghandi University, Indie oraz dyrektor Centre for Nanoscience and Nanotechnology Mahatma Ghandi University. Współpraca ta zaowocowała:

- wspólnym prowadzeniem doktoratu (Mohammed Arif P., Development of dual percolating network of CNTs in co-continuous polymer blends based on PP/PET for EMI shielding applications), certyfikat w załączniku nr 7
  - organizacją wspólnych konferencji, certyfikat w załączniku nr 8:
    - (Convenor) Second International Conference on Advanced Materials for Power Engineering (ICAMPE 2016), Kottayam, India
    - (Convenor) First International Conference on Advanced Materials for Power Engineering (ICAMPE 2015), Kottayam, India;
    - (Co-Chairman) Third International conference on Recycling and Reuse of Materials (ICRM 2014), Kottayam, India;
    - (Co-Chairman) International conference on Advanced Polymeric Materials 2013 (ICAPM 2013), Kottayam, India),
  - edytorstwem wspólnych książek, certyfikat w załączniku nr9:
    - **Maciej Jaroszewski [Ed]**, Sabu Thomas [Ed], Ajay Rane [Ed], *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding*, Wiley; w trakcie edycji;
    - Thomas Sabu [Red.], Kalarikkal Nandakumar [Red.], **Jaroszewski Maciej**, Jose Josmin P: *Advanced polymeric materials : from macro- to nano-length scales*. Oakville, ON ; Apple Academic Press, cop. 2016)
    - Reza Haghi [Ed], Emili Besalú [Ed], **Maciej Jaroszewski [Ed]**, Sabu Thomas [Ed], Praveen K. M. [Ed]: *Modern Physical Chemistry Engineering Models, Materials, and Methods with Applications*. Apple Academic Press AAP , ISBN 9781771886437. Data publikacji styczeń 2018
    - Jithin Joy [Ed], **Maciej Jaroszewski [Ed]**, Praveen K. M. [Ed], Sabu Thomas [Ed], Reza Haghi [Ed]: *Engineering Technologies for Renewable and Recyclable Materials Physical-Chemical Properties and Functional Aspects*. Apple Academic Press (AAP) ISBN 9781771886536. Data publikacji luty 2018
  - edytorstwem tematycznego wydania „Materials for Dielectric Applications” czasopisma European Physical Journal. B, Condensed Matter and Complex Systems, certyfikat w załączniku nr 10
- Prof Charanjeet Singh, z Rayat Bahra Institute of Engg. & Nanotechnology Hoshiarpur Punjab India. Współpraca zaowocowała cyklem 5 publikacji monotematycznych w czasopismach z IF:
    1. Charanjeet Singh, S. Bindra Narang, **Maciej Jaroszewski**, Vikas Bhikan, Pawandeep Kaur; Schottky-Richardson, Poole-Frenkel and Space charge limited current

mechanisms in M-Type  $\text{Sr}(\text{MnTi})_x\text{Fe}(12-2x)\text{O}_{19}$  Ferrite; Journal of the American Ceramic Society; 99 (11), 3639-3644; 2016; IF - 2.787

2. Charanjeet Singh, **Maciej Jaroszewski**, Sukhleen Bindra Narang and D. Ravinder Thermolectric and electrical properties of  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_x\text{Ru}_x\text{Fe}(12-2x)\text{O}_{19}$  ferrite. Eur. Phys. J. B, 89 5 (2016) 110; IF - 01.345
  3. Bhikhan Vikas, Singh Charanjeet, Kaur Rajneesh, **Jaroszewski Maciej**, Narang S. Bindra: Investigation of DC current models in  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Ti}^{4+}$  substituted M-type  $\text{BaCo}_x\text{Ti}_x\text{Fe}(12-2x)\text{O}_{19}$  ferrite. European Physical Journal. B, Condensed Matter and Complex Systems. 2015, vol. 88, nr 325; IF - 01.345
  4. Bhikhan Vikas, Singh Charanjeet, Kaur Rajneesh, **Jaroszewski Maciej**, Narang S. Bindra: Static conduction mechanisms in  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Ti}^{4+}$  substituted M-type  $\text{SrCo}_x\text{Ti}_x\text{Fe}(12-2x)\text{O}_{19}$  ferrite. European Physical Journal. B, Condensed Matter and Complex Systems. 2015, vol. 88, nr 324; IF - 01.345 (2014)
  5. Kaur Rajneesh, Singh Charanjeet, Bhikhan Vikas, **Jaroszewski Maciej**, Narang S. Bindra: Static current models in  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Ti}^{4+}$  substituted M-type  $\text{CaCo}_x\text{Ti}_x\text{Fe}(12-2x)\text{O}_{19}$  ferrite. European Physical Journal. B, Condensed Matter and Complex Systems. 2015, vol. 88, nr 245; IF - 01.345
- Prof. Abderrahmane Beroual z Ecole Centrale de Lyon, Francja, associate editor IEEE TDEI. Współpraca została nawiązana w dziedzinie badania biodegradowalnych olejów transformatorowych. Na chwilę obecną wynikiem współpracy jest:
    - wspólny artykuł dotyczący ruchu elektrohydrodynamicznego w oleju biodegradowalnym, przyjęty do recenzji w IEEE TDEI,
    - referat wygłoszony na konferencji Inżynieria Wysokonapięciowa IW2018,
    - artykuł wysłany do publikacji w Przeglądzie Elektrotechnicznym,
    - referat przyjęty na konferencję IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2018),



#### **5.4. Edytorstwo prac zbiorowych o zasięgu międzynarodowym:**

Reza Haghi [Ed], Emili Besalú [Ed], **Maciej Jaroszewski** [Ed], Sabu Thomas [Ed], Praveen K. M. [Ed]: Modern Physical Chemistry Engineering Models, Materials, and Methods with Applications. Apple Academic Press AAP , ISBN 9781771886437. Data publikacji styczeń 2018

Jithin Joy [Ed], **Maciej Jaroszewski** [Ed], Praveen K. M. [Ed], Sabu Thomas [Ed], Reza Haghi [Ed]: Engineering Technologies for Renewable and Recyclable Materials Physical-Chemical Properties and Functional Aspects. Apple Academic Press (AAP) ISBN 9781771886536. Data publikacji luty 2018

**Maciej Jaroszewski** [Ed], Sabu Thomas [Ed], Ajay Rane [Ed], Advanced Materials for Electromagnetic Shielding, Wiley; w trakcie edycji (rozdziały po recenzjach przekazane zostały do Wydawnictwa),

Thomas Sabu [Red.], Kalarikkal Nandakumar [Red.], **Jaroszewski Maciej**, Jose Josmin P: Advanced polymeric materials: from macro- to nano-length scales. Oakville, ON; Apple Academic Press, cop. 2016

**Maciej Jaroszewski** and Sabu Thomas (Guest editors): Topical issue: Materials for Dielectric Applications; European Physical Journal. B, Condensed Matter and Complex Systems  
IF - 01.345

Bronisław Szubzda, **Maciej Jaroszewski**, Sylwia Talik, Grzegorz Paściak; 8th National Scientific Conference Advances in Electrotechnology (Postepy w Elektrotechnologii) 23–25 September 2015, Jamrozowa Polana, Poland, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 113, Number 1

**Jaroszewski Maciej [Red.]**, Ziaja Jan [Red.], Pospieszna Janina [Red.]: EM shielding - theory and development of new materials. Kerala: Research Signpost, 2012,  
ISBN: 978-81-308-0499-6

## **5.5. Wskaźniki bibliometryczne**

<http://orcid.org/0000-0002-9712-5541>

<http://www.researcherid.com/rid/A-4836-2012>

<https://publons.com/a/1314416>

<https://scholar.google.pl/citations?user=Tv49Y5wAAAAJ&hl=pl&oi=ao>

- Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania: 22,462
- Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS): 40
- Indeks Hirscha
  - według bazy Web of Science (WoS): 4
  - według bazy Google Scholar: 6
  - według bazy Scopus: 4
- Liczba punktów MNiSW: 436

## **5.6. Jestem recenzentem w poniższych czasopismach i konferencjach:**

IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation

IEEE Trans. On Power Delivery

IEEE Sensors Journal

Journal of Alloys and Compounds (Certyfikat “Outstanding Contribution in Reviewing” w załączniku nr 12)

Sensors and Actuators A: Physical

Composite Interfaces

RSC Nanoscale

RSC Journal of Materials Chemistry A

RSC Journal of Materials Chemistry C

Archives of Metallurgy and Materials

RSC Advances

Textile Research Journal

Progress in Electromagnetics Research

Elsevier International Journal of Pure and Applied Analytical Chemistry (Talanta)

European Physical Journal B

Modern Physics Letters B

International Conference on Environment and Electrical Engineering co-sponsored by IEEE and IEEE PES; IEEEIC 2011, IEEEIC 2012, IEEEIC 2104

20<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering ISH 2017

Wniosku o grant celowy nr rej. 411/30/3 z 2010

### **5.7. Udział w grantach badawczych:**

Projekt kluczowy POIG no. 01.03.01-00-006/08 „Barierowe materiały nowej generacji chroniące człowieka przed szkodliwym działaniem środowiska”, dofinansowany w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007 – 2013, wykonawca

Grant KBN 4T10B 037 22 "Procesy degradacji i metody diagnozowania wysokonapięciowych ograniczników przepięć z warystorami z tlenków metali dla sieci elektroenergetycznych" – **Kierownik grantu;** 2002-2004

Grant KBN 8T10C00208 "System do pomiaru i rejestracji składowej rezystancyjnej prądu ograniczników przepięć z warystorami tlenkowymi" – **Kierownik grantu;** 1999

Grant KBN 8S50202707 "Metody i kryteria określenia odporności ograniczników przepięć na narażenia zabrudzeniowe" – wykonawca; przed 1999

### **5.8. Inne:**

Visiting Professor, Centre for Nanoscience and Nanotechnology of Mahatma Gandhi University, Kottayam, India, 2015, certyfikat w załączniku nr11

Organizator Sesji Specjalnej i przewodniczący sesji na międzynarodowej konferencji Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2013), Szwecja, 2013

Zaproszony autor i przewodniczący sesji na First International Conference on Plasma Processing of Organic Materials and Polymers (PPOMP 2011), 25-27 November 2011, Kottayam, Kerala, India.

Zaproszony przez wydawnictwo InTech do współautorstwa w książce “Polypropylene” (Ed) Fatih Doğan, ISBN 978-953-51-0636-4; wydana w 2012 r. (Rozdział: Jaroszewski Maciej, Pospieszna Janina, Ziaja Jan, Ozimek Mariusz: Composites made of polypropylene nonwoven fabric with plasmas layers)

Zaproszony przez wydawnictwo Research Signpost jako edytor książki. Książka „EM Shielding – Theory and Development of New Materials” (Ed) Maciej Jaroszewski, Jan Ziaja, Janina Pospieszna, ISBN: 978-81-308-0499-6; 2013



.....  
podpis Wnioskodawcy