

Prof. dr hab. inż. Andrzej Cichoń
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

Opole, 02.03.2025 r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 7.03.2025

Zarejestrowano pod nr 510-14-7/24

Podpis Jm

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Dąda

pt. „Analiza wpływu wybranych nanowypełniaczy nieorganicznych na parametry dielektryczne jednorodnych i modyfikowanych gradientowo nanokompozytów epoksydowych dla zastosowań wysokonapięciowych”.

Podstawa formalna wykonania recenzji:

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie, dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny nr 106/2024 z dnia 12 grudnia 2024 r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Paweł Zydroń, prof. AGH, natomiast promotorem pomocniczym jest dr inż. Maciej Kuniewski.

1. Ocena aktualności tematu, celu i zakresu rozprawy

Rozwój technologiczny, jak również materiałowy różnych dziedzin przemysłu wymusza stale zwiększające się wymagania w zakresie parametrów technicznych wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Wiąże się to nieodzownie z ciągłym wzrostem mocy i napięć znamionowych urządzeń oraz sieci elektroenergetycznych, a także koniecznością zapewnienia odpowiedniej niezawodności ich działania i wydłużenia czasu eksploatacji. Aby sprostać wyzwaniom w tym zakresie konieczne jest prowadzenie optymalizacji układów izolacyjnych pod względem konstrukcyjnym z wykorzystaniem nowoczesnych technologii wytwarzania materiałów elektroizolacyjnych opartych m. in. o wykorzystanie inżynierii nanomateriałów.

W ostatnich latach w sposób szczególny prowadzone są prace związane z rozwojem polimerowych materiałów kompozytowych, które charakteryzują się dobrymi parametrami izolacyjnymi oraz dużymi możliwościami modyfikacji tych właściwości i parametrów w procesie produkcji. Istnieje wiele prac naukowych wykazujących możliwości poprawy parametrów elektrycznych, mechanicznych lub cieplnych materiałów polimerowych poprzez domieszkowanie drobnymi cząsteczkami organicznymi lub nieorganicznymi. Tak zmodyfikowane materiały mają bardzo duży potencjał aplikacyjny. Szczególnie interesujące są prace związane ze stosowaniem nanocząsteczek jako domieszek do bazowej matrycy polimerowej. Dostępne w literaturze wyniki badań wskazują na możliwości uzyskania

A. Cichoń

lepszonych parametrów dla nanokompozytów niż dla polimerów niemodyfikowanych lub modyfikowanych mikronapełniaczami. Główną zaletą nanokompozytów jest możliwość uzyskania rozsądnego kompromisu pomiędzy różnymi parametrami materiału powodując poprawę niektórych przy jednoczesnym pogorszeniu pozostałych.

Ciekawymi z punktu widzenia potencjalnych zastosowań praktycznych są funkcjonalne materiały gradientowe (FGM), dla których co najmniej jeden parametr zmienia się gradientowo w strukturze materiału. Materiały te mogą mieć zastosowanie w miejscach, w których występują niejednorodne naprężenia. Zastosowanie tych materiałów pozwala na złagodzenie lub wyeliminowanie problemów związanych z nagłą zmianą właściwości materiału w obszarach granicznych.

Rozwój technologii związanej z nanodielektrykami może przynieść wiele korzyści w zakresie poprawy właściwości dielektrycznych tj.: ograniczenie obecności ładunków przestrzennych, zwiększenie przenikalności elektrycznej dla zastosowań magazynowania energii elektrycznej, poprawy przewodności cieplnej, wzrostu odporności na wyładowania niezupełne czy zwiększenia wytrzymałości materiału na przebicie.

Technologia nanodielektryków jest ciekawym i interesującym obszarem badawczym w zakresie jej zastosowania w wysokonapięciowych układach izolacyjnych. Do pełnego wykorzystania jej możliwości konieczne jest jednak prowadzenie prac naukowo – badawczych w celu lepszego zrozumienia i poznania ich właściwości oraz opracowania wiarygodnych modeli numerycznych, które pozwolą na pełne wykorzystanie ich w przemyśle.

W recenzowanej rozprawie wykonano kompleksowe badania właściwości nanokompozytów jednorodnych oraz funkcjonalnych materiałów gradientowych. Pomiary przeprowadzono na specjalnie przygotowanych próbkach z nanocząsteczkowymi napełniaczami nieorganicznymi wykorzystywanymi do modyfikacji właściwości elektrycznych nanokompozytów jednorodnych oraz do kształtowania gradientu przenikalności elektrycznej w kompozytach gradientowych. Jako polimer bazowy zastosowano żywicę epoksydową, którą domieszkowano: dwutlenkiem tytanu TiO_2 , dwutlenkiem krzemu SiO_2 oraz tritlenkiem diglinu Al_2O_3 , a do wytwarzania materiałów gradientowych wykorzystano również tytanian baru BaTiO_3 , ze względu na wysoką wartość przenikalności elektrycznej względnej tego materiału. Dla wytworzonych próbek nanokompozytów jednorodnych wykonano następujące badania: pomiar stałej dielektrycznej ϵ_r oraz współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ metodą spektroskopii impedancyjnej; pomiary elektrometryczne (prądy polaryzacji i depolaryzacji oraz rezystywność skrośna ρ_v), detekcja i analiza wyładowań niezupełnych oraz próby napięciowe. W przypadku analizy właściwości próbek gradientowych wykonano badania z wykorzystaniem spektroskopii impedancyjnej wyznaczając stałą dielektryczną ϵ_r oraz współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ w szerokim zakresie częstotliwości.

Uwzględniając powyższe, uważam, że tematyka poruszana w pracy jest aktualna i ważna ze względu na jej znaczenie poznawcze i praktyczne.

W rozprawie sformułowano następujące cele badawcze pracy:

- uzyskanie kompetencji dotyczących wytworzenia jednorodnych nanokompozytów epoksydowych z różnego rodzaju nanonapełniaczami (TiO_2 , SiO_2 i Al_2O_3) o różnych rozmiarach nanocząstek i procentowych zawartościach wagowych;
- określenie wpływu utwardzania i starzenia temperaturowego (60°C , 130°C , 180°C) na właściwości dielektryczne wytworzonych nanokompozytów;

- określenie wpływu nanonapełniaczy i ich parametrów na przenikalność elektryczną, współczynnik strat dielektrycznych, rezystywność skrośną oraz wytrzymałość elektryczną wytworzonych nanokompozytów epoksydowych;
- opracowanie i zastosowanie w praktyce metody wytwarzania nanokompozytowych materiałów izolacyjnych typu FGM o gradientowo zmodyfikowanej przenikalności elektrycznej na bazie żywicy epoksydowej z dodatkiem nanonapełniaczy (TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 lub BaTiO_3) z wykorzystaniem metody elektroforezy;
- określenie wpływu czynników materiałowych (rozmiar cząstek wypełniacza), geometrycznych (układ elektrod) oraz procesowych (natężenie zewnętrznego pola elektrycznego) na uzyskane zmiany wartości przenikalności elektrycznej w próbkach modelowych izolacyjnego materiału gradientowego;
- analiza przebiegu procesu wytwarzania modelowych próbek gradientowych na podstawie obserwacji prądu elektroforetycznego i temperatury próbki, podczas aplikacji napięcia stałego powodującego realizację procesu elektroforezy w objętości próbki.

Uważam, że cele pracy są ambitne i spełniające wymagania stawiane pracom doktorskim.

Autorka przedstawiła dwie tezy pracy, które sformułowała w sposób jawny w rozdziale pierwszym:

Teza 1

Właściwości dielektryczne nanokompozytów epoksydowych są złożoną i nieoczywistą funkcją różnych czynników materiałowych i procesowych – zastosowanego nanonapełniacza, rozmiaru jego cząstek i procentowej zawartości wagowej, a także przebiegu procesu utwardzania i starzenia temperaturowego. Odpowiedni dobór i weryfikacja eksperymentalna tych czynników umożliwiają uzyskanie materiałów dielektrycznych o kontrolowanych parametrach, co może zostać zastosowane dla optymalizacji konstrukcji układów izolacji wysokonapięciowej.

Teza 2

Stosując metodę elektroforezy możliwe jest wytworzenie modelowych, kompozytowych układów izolacyjnych typu FGM, na bazie żywicy epoksydowej z nanonapełniaczami nieorganicznymi, o gradientowo modyfikowanej przenikalności elektrycznej, w odstępach międzyelektrodowych o wymiarach, które są charakterystyczne dla układów izolacji urządzeń wysokonapięciowych.

Tezy pracy są poprawne i odpowiednio sformułowane.

2. Charakterystyka pracy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 282 strony. Zawiera siedem rozdziałów, wykaz oznaczeń i skrótów, streszczenie, załącznik oraz bibliografię zawierającą 304 pozycje, wśród których przeważają publikacje w czasopismach zagranicznych, a także występują artykuły opublikowane w czasopismach krajowych oraz karty katalogowe i normy. Uważam, że literatura zacytowana w rozprawie doktorskiej została dobrana w sposób poprawny. Doktorantka jest współautorką 5 cytowanych pozycji.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do podjętej tematyki. Przedstawiono w nim kontekst pracy i scharakteryzowano motywację do przeprowadzenia badań. W sposób jawny przedstawiono tezy i cele naukowe pracy oraz omówiono zakres rozprawy.

W rozdziale drugim scharakteryzowano nanodielektryki. W sposób szczegółowy omówiono genezę ich powstania oraz obszar obecnych i przyszłych zastosowań. Dodatkowo omówiono pojęcie interfazy, która determinuje właściwości nanokompozytów. Scharakteryzowano różne modele interfazy, takie jak: model podwójnej warstwy elektrycznej, model zmiany natężenia, model wielowarstwowy oraz model objętościowy, które w różny sposób wyjaśniają rodzaj i dynamikę interakcji pomiędzy cząstkami nanowypełniacza a matrycą polimerową. Rozdział ten zawiera również charakterystykę zastosowanych materiałów. Omówiono żywice epoksydowe, dwutlenek tytanu TiO_2 , dwutlenek krzemu SiO_2 , tritlenek diglinu Al_2O_3 oraz tytanian baru BaTiO_3 . Scharakteryzowano również zagadnienie funkcjonalnych materiałów gradientowych FGM i zjawiska elektroforezy będącej narzędziem wytwarzania tego rodzaju materiałów kompozytowych.

Rozdział trzeci zawiera charakterystykę zjawisk występujących w dielektrykach. Zdefiniowano podstawowe pojęcia i wielkości, które są istotne z punktu widzenia dalszych części pracy oraz dla analizy i interpretacji wyników przeprowadzonych badań tj.: dipole elektryczne, wektor i rodzaje polaryzacji, przenikalność elektryczna, prądy w dielektryku, współczynnik strat dielektrycznych, model kondensatora z dielektrykiem stratnym oraz relaksacja dielektryczna.

W rozdziale czwartym scharakteryzowano techniki i procedury zastosowane do wytwarzania próbek nanokompozytowych, poddanych następnie zaplanowanemu programowi badań. Przedstawiono metody wytwarzania próbek jednorodnych i gradientowych, ze szczególnym uwzględnieniem kluczowych etapów procesu ich produkcji.

Rozdział piąty zawiera opis zastosowanej metodyki pomiarowej oraz aparatury badawczej wykorzystanej podczas pomiarów. Szczegółowo scharakteryzowano m.in.: stanowisko do badania spektroskopii impedancyjnej i dielektrycznej dla układów próbek jednorodnych i gradientowych, stanowisko do pomiaru prądów polaryzacji i depolaryzacji oraz metodykę wyznaczania rezystywności skrośnej, a także układ do detekcji wyładowań niezupełnych, stanowisko do badania wytrzymałości elektrycznej oraz skaningowy mikroskop elektronowy.

Za najważniejszy w rozprawie uważam obszerny rozdział szósty, który zawiera oryginalne wyniki badań Doktorantki.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki badań samodzielnie przygotowanych próbek nanokompozytowych oraz przeprowadzono analizę i dyskusję otrzymanych rezultatów badań. Wyniki badań podzielono na dwie zasadnicze części: badania próbek nanokompozytów jednorodnych oraz gradientowych modyfikowanych elektroforetycznie. Dla próbek nanokompozytów jednorodnych przeprowadzono badania na 32 grupach samodzielnie przygotowanych próbek kompozytowych

wykonanych na bazie żywicy epoksydowej z nanonapełniaczami tlenkowymi TiO_2 , SiO_2 i Al_2O_3 o różnych rozmiarach cząstek oraz o ich różnej procentowej zawartości wagowej. Danymi referencyjnymi były wyniki pomiarów przeprowadzonych na grupie próbek przygotowanych z tej samej żywicy bazowej bez żadnych dodatków. W ramach prac badawczych przeprowadzono także analizy wpływu kilkustopniowego utwardzania temperaturowego wytworzonych próbek nanokompozytowych na szerokopasmowe charakterystyki przenikalności elektrycznej względnej ϵ_r , współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ oraz rezystywności skrośnej ρ_v . Dodatkowo na każdym etapie utwardzania termicznego wykonano pomiary mające na celu wykrycie ewentualnej obecności źródeł wyładowań niezupełnych w badanych próbkach oraz określenie ich wytrzymałości elektrycznej. W przypadku badań próbek nanokompozytów epoksydowych modyfikowanych gradientowo wykonano pomiary na żywicznych próbkach modelowych z dodatkiem 4 rodzajów napełniaczy nieorganicznych TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 lub BaTiO_3 o różnych rozmiarach cząstek. Gradientowa modyfikacja koncentracji nanocząstek została wymuszona poprzez zastosowanie metody elektroforezy. Podczas badań analizowano wpływ trzech niezależnych czynników wpływających na uzyskanie gradientu przenikalności elektrycznej: czynnik materiałowy, wynikający z zastosowania nanocząstek o różnych rozmiarach, czynnik geometryczny, wynikający z zastosowania dwóch różnych układów elektrod, tj. układu elektrod płaska-płaska oraz ostrze-płaska; czynnik procesowy, wynikający z zastosowania czterech różnych wartości napięcia, warunkującego powstanie pola elektrycznego w materiale próbki. Dla przygotowanych próbek wyznaczono szerokopasmowe charakterystyki przenikalności elektrycznej względnej ϵ_r oraz współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$. Wyznaczono również prąd, ładunek elektryczny i temperaturę podczas procesu elektroforetycznego formowania ich właściwości gradientowych.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie wyników badań zrealizowanych w ramach rozprawy doktorskiej oraz propozycje kierunków dalszych prac.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktorantki zaliczam:

- zaimplementowanie metodyki i budowa stanowiska do wytwarzania nanokomponentów gradientowych modyfikowanych elektroforetycznie umożliwiającego samodzielne wykonywanie próbek materiałów z różnymi nanodomieszkami,
- określenie wpływu konfiguracji elektrod na uzyskane wartości gradientu, co może być użyteczne w projektowaniu izolacji urządzeń elektrycznych oraz kształtowaniu rozkładów pola elektrycznego wokół elektrod o większej krzywiznie,
- udowodnienie, że metoda elektroforezy pozwala na kontrolowane kształtowanie gradientu przenikalności elektrycznej w nanokompozytach epoksydowych,
- przeprowadzenie obszernej analizy wpływu rodzaju, rozmiaru i procentowej zawartości wagowych zastosowanych nanowypełniaczy, a także procesu utwardzenia (starzenia temperaturowego), na ich parametry dielektryczne tj.: przenikalności elektrycznej względnej ϵ_r , współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ oraz rezystywności skrośnej ρ_v ,
- wykazanie, na podstawie uzyskanych charakterystyk $\epsilon_r(f)$ i $\text{tg}\delta(f)$ oraz wartości ρ_v badanych próbek, że zależności zarówno od czynników materiałowych, jak również procesowych na obserwowane zmiany wartości tych parametrów nie mają charakteru monotonicznego,

- wykazanie, że zawartość nanowypełniacza nie wpływa proporcjonalnie na obniżenie ruchliwości elementów struktury polimeru bazowego i przenikalności elektrycznej, ze względu na obecność dwóch różnych mechanizmów mających wpływ na gromadzenie ładunków elektrycznych w kompozycie,
- wyznaczenie nieliniowego wpływu zastosowanych nanowypełniaczy na zwiększenie wytrzymałości dielektrycznej.

Doktorantka w stopniu biegłym opanowała tematykę rozprawy w warstwie nie tylko teoretycznej, ale także praktycznej, w oparciu o dobre rozeznanie problemów naukowo – badawczych dotyczących metod wytwarzania oraz pomiarów parametrów dielektrycznych nanokompozytów jednorodnych i modyfikowanych. Potrafiła przeprowadzić kompleksową procedurę badawczą obejmującą szczegółowe rozpoznanie teoretyczne realizowanego tematu, wykonanie próbek do badań oraz przeprowadzenie pomiarów poszczególnych parametrów dielektrycznych.

Stwierdzam, że Doktorantka dysponuje wymaganiem do prowadzenia badań naukowych zasobem wiedzy z zakresu dyscypliny naukowej: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

4. Ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Podział treści rozprawy jest logiczny i uporządkowany. Styl oraz poziom językowy jest dobry. Szata graficzna jest bardzo staranna i dopracowana. Sposób przekazywania treści jest zadowalający. Wszystkie symbole zostały precyzyjnie objaśnione. Informacja jest dość dobrze wyważona. Jednak warto zauważyć, że pracy występują powtórzenia treści, które zwiększają i tak bardzo duży rozmiar rozprawy.

Czytając lekturę pracy odnosi się wrażenie o wysokiej kompetencji merytorycznej Autorki, która potrafi dodatkowo przedstawić swoje wyniki w sposób przyjazny dla czytelnika. W pracy można znaleźć bardzo niewielką ilość błędów edytorskich, stylistycznych, gramatycznych. Nie wpływają one w żadnym stopniu na wysoką ocenę redakcji rozprawy.

5. Uwagi merytoryczne

1. Do wytworzenia nanokompozytów jednorodnych wykorzystano dwuskładnikową żywicę epoksydową Epoxylite 235SG oraz nanocząstki: dwutlenek tytanu TiO_2 , dwutlenek krzemu SiO_2 , tritlenek diglinu Al_2O_3 , natomiast dla nanokompozytów gradientowych modyfikowanych elektroforetycznie poza ww. nanocząstkami wykorzystano jeszcze tytanian baru BaTiO_3 . Na jakiej podstawie zdecydowano się na wykorzystanie takich składników do tworzenia próbek nanokompozytów i jakie parametry o tym zdecydowały? Dlaczego tytanian baru BaTiO_3 nie został wykorzystany do wytworzenia próbek nanokompozytów jednorodnych? Czy Doktorantka rozważała wykorzystanie innych materiałów do tworzenia próbek nanokompozytów?

2. W procesie wytwarzania próbek badanych nanokompozytów istotną rolę odgrywa odgazowanie czyli usunięcie pozostałych podczas mieszania inkluzji gazowych z żywicy epoksydowej lub wytwarzanego na jej bazie nanokompozytu. Jakim parametrem określano stopień odgazowania próbki na etapie jej wytworzenia? Podczas wykonywania testu obecności wyładowań niezupełnych stwierdzono obecność wyładowań w 5 próbkach. Jako powód ich występowania podano obecność inkluzji gazowych. W jaki sposób potwierdzono obecność inkluzji na etapie pomiarów?
3. Procedura badawcza wytworzonych próbek nanokompozytowych obejmowała wykonanie pomiarów bezpośrednio po ich wykonaniu w temperaturze otoczenia, następnie po kolejnych 8 godzinnych etapach utwardzania (starzenia) w temperaturach 60, 130 i 180°C. Na jakiej podstawie wyznaczono taką procedurę utwardzania (starzenia) termicznego? Jakich zmian badanych parametrów można się spodziewać przedłużając okres starzenia termicznego?
4. Czy w trakcie badań eksperymentalnych była przeprowadzana analiza powtarzalności uzyskanych wyników pomiarowych?
5. Z jaką dokładnością wykonywano pomiary poszczególnych parametrów: przenikalności elektrycznej względnej ϵ_r , współczynnika strat dielektrycznych $\tan \delta$ oraz rezystywności skrośnej ρ_v ?

Zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia nie wpływają w sposób znaczący na wartość merytoryczną rozprawy.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Autorka przeprowadziła bardzo ciekawe i obszerne badania w zakresie analizy właściwości nanokompozytów jednorodnych i gradientowych modyfikowanych elektroforetycznie. Samodzielnie wytworzyła próbki nanokompozytów i poddała je badaniom według ściśle określonej procedury badawczej. Wykazała, że analizowane właściwości nanokompozytów epoksydowych są funkcją wielu różnego rodzaju parametrów. Wykorzystała metodę elektroforezy do wytworzenia próbek nanokompozytów gradientowych oraz przeanalizowała procedurę ich wytwarzania. W wyniku przeprowadzonych badań wykazała, że możliwe jest uzyskanie nanokompozytów o parametrach kontrolowanych w określonym zakresie i dostosowanych do konkretnych wymagań danego układu izolacyjnego. Wykonane przez Doktorantkę badania wykazały również, że zmiany wartości parametrów dielektrycznych są funkcją co najmniej kilku parametrów, zarówno materiałowych jak i procesowych oraz że charakter tych zmian nie jest monotoniczny względem zawartości procentowej nanonapełniacza. Ponadto w ramach recenzowanej rozprawy przeprowadzono badania zmierzające do analizy wpływu trzech czynników bezpośrednio wpływających na uzyskanie gradientu przenikalności elektrycznej w próbkach nanokompozytu epoksydowego. We wszystkich przypadkach potwierdzono występowanie efektu gradientowej modyfikacji przenikalności elektrycznej. W wyniku



przeprowadzonych prac udowodniono, że elektroforeza może być zastosowana do gradientowej modyfikacji przenikalności elektrycznej nanokompozytów.

Przeprowadzone badania wymagały od Doktorantki dużej wiedzy teoretycznej obejmującej znajomość budowy i właściwości nanodielektryków, mechanizmów ich wytwarzania, a także mechanizmów jakie zachodzą w dielektrykach oraz metodyki prowadzenia pomiarów w zakresie parametrów dielektrycznych. Realizacja pracy wymagała również znaczącej wiedzy praktycznej z zakresu wykonywania pomiarów w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem dużej ilości zaawansowanej aparatury pomiarowej.

Doktorantka wykazała, że ma niezbędne kwalifikacje do prowadzenia badań naukowych oraz rozwiązała w sposób oryginalny zagadnienie naukowe będące tematem rozprawy.

Rozwiązanie problemu postawionego w pracy jest ciekawe z punktu widzenia możliwości jego praktycznego wykorzystania do budowy nowoczesnych układów izolacyjnych o modyfikowanych parametrach dielektrycznych. Praca zawiera elementy nowości w sensie naukowym, stanowiące udokumentowany dorobek własny Doktorantki.

Stwierdzam, że opiniowana praca jest kompletna i nie wymaga żadnych zmian ani uzupełnień. Spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę o przyjęcie niniejszej pracy jako rozprawy doktorskiej. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Anny Dąda do publicznej obrony przedłożonej pracy w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.



Prof. dr hab. inż. Andrzej Cichoń